
SOMMAIRE

Préface	VII
Rapports des 41 sections du Comité national	1
Physique nucléaire et physique des particules	3
Section n° 01 - Interactions, particules, noyaux, du laboratoire au cosmos.....	5
Physique	25
Section n° 02 - Théories physiques : méthodes, modèles et applications.....	27
Section n° 03 - Matière condensée : structure et propriétés électroniques.....	49
Section n° 04 - Atomes et molécules, optique et lasers, plasmas chauds.....	71
Section n° 05 - Matière condensée : organisation et dynamique.....	95
Section n° 06 - Sciences de l'information : fondements de l'informatique, calculs, algorithmes, représentations, exploitations.....	111
Section n° 07 - Sciences de l'information : signaux, images, langues, automatique, robotique, interactions, systèmes intégrés matériel-logiciel.....	129
Sciences de l'ingénierie et des systèmes	147
Section n° 08 - Micro- et nanotechnologies, micro- et nanosystèmes, photonique, électronique, électromagnétisme, énergie électrique.....	149
Section n° 09 - Mécanique des solides. Matériaux et structures. Biomécanique. Acoustique.....	171
Section n° 10 - Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation.....	187
Chimie	211
Section n° 11 - Systèmes et matériaux supra et macromoléculaires : élaboration, propriétés, fonctions.....	213
Section n° 12 - Architectures moléculaires : synthèses, mécanismes et propriétés.....	247
Section n° 13 - Chimie physique, théorique et analytique.....	267
Section n° 14 - Chimie de coordination, catalyse, interfaces et procédés.....	285
Section n° 15 - Chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés.....	303
Section n° 16 - Chimie et vivant.....	321

Sciences de l'univers	347
Section n° 17 - Système solaire et univers lointain.....	349
Section n° 18 - Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles.....	363
Section n° 19 - Système Terre : enveloppes superficielles.....	379
Sciences biologiques	395
Section n° 20 - Biologie moléculaire et structurale, biochimie.....	397
Section n° 21 - Organisation, Expression, Évolution des génomes. Bioinformatique et Biologie des systèmes.....	419
Section n° 22 - Biologie cellulaire, développement, évolution – développement.....	433
Section n° 23 - Biologie végétale intégrative.....	447
Section n° 24 - Physiologie, vieillissement, tumorigenèse.....	469
Section n° 25 - Neurobiologie moléculaire et cellulaire, neurophysiologie.....	485
Section n° 26 - Cerveau, cognition, comportement.....	501
Section n° 27 - Relations hôte-pathogène, immunologie, inflammation.....	525
Section n° 28 - Pharmacologie-ingénierie et technologies pour la santé – imagerie biomédicale.....	545
Écologie et environnement	565
Section n° 29 - Biodiversité, évolution et adaptations biologiques : des macromolécules aux communautés.....	567
Section n° 30 - Surface continentale et interfaces.....	585
Section n° 31 - Hommes et milieux : évolution, interactions.....	613
Sciences humaines et sociales	633
Section n° 32 - Mondes anciens et médiévaux.....	635
Section n° 33 - Mondes modernes et contemporains.....	655
Section n° 34 - Sciences du langage.....	675
Section n° 35 - Sciences philosophiques et philologiques, sciences de l'art.....	697
Section n° 36 - Sociologie et sciences du droit.....	745
Section n° 37 - Économie et gestion.....	763
Section n° 38 - Anthropologie et étude comparative des sociétés contemporaines.....	777
Section n° 39 - Espaces, territoires et sociétés.....	799
Section n° 40 - Politique, pouvoir, organisation.....	823
Sciences mathématiques et leurs interactions	845
Section n° 41 - Mathématiques et interactions des mathématiques.....	847
Rapports des 5 commissions interdisciplinaires du Comité national	861
CID n° 50 - Gestion de la recherche.....	863
CID n° 51 - Modélisation, et analyse des données et des systèmes biologiques : approches informatiques, mathématiques et physiques.....	875
CID n° 52 - Environnements sociétés : du fondamental à l'opérationnel.....	893

CID n° 53 - Méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques	911
CID n° 54 - Méthodes expérimentales, concepts et instrumentation en sciences de la matière et en ingénierie pour le vivant	927
Liste des sigles et des abréviations	941
Index des membres des Sections et Commissions interdisciplinaires	943
Direction et réalisation	944

PRÉFACE

Vous trouverez dans les pages qui suivent, sous format numérique ou sous format papier, le nouveau rapport de conjoncture scientifique établi par le Comité national de la recherche scientifique. Fruit d'un intense travail de l'ensemble des sections et des commissions interdisciplinaires, il fournit une photographie fidèle de l'état de la recherche au sein du paysage français de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation. Il propose également des directions de recherche, jugées importantes ou prometteuses, pour les années à venir. Cet ensemble constitue une mine d'informations qui sera utile, bien au-delà du seul CNRS, à tout établissement se livrant à un exercice de prospective scientifique. Il pourra également être mis à profit par tout chercheur ou toute chercheuse s'intéressant à des thématiques plus larges que son propre domaine de recherche.

La plus grande partie de rapport de conjoncture suit l'organisation du Comité national en sections, et ainsi naturellement présentée dans une logique essentiellement disciplinaire. Les spécialistes y trouveront matière à réflexion, à échanges et aussi parfois à débats comme c'est l'usage dans ce type d'exercice.

Mais une lecture « croisée » des contributions des différentes sections, et bien sûr la partie du rapport rédigée par les commissions interdisciplinaires illustrent aussi l'importance de l'interdisciplinarité dans la science d'aujourd'hui. Une telle interdisciplinarité ne peut se construire, aujourd'hui comme demain, qu'en s'appuyant sur des disciplines fortes et reconnues. Mais elle est essentielle pour résoudre nombre de grands challenges scientifiques. Pour n'en citer qu'un, l'importance grandissante des données dans toutes les sciences nécessitent de nouvelles approches ayant une double dimension générique et spécifique. Ainsi, une fois encore, les sciences s'enrichiront mutuellement. L'interdisciplinarité est également essentielle pour mener à bien une mission essentielle du CNRS, appliquer la recherche fondamentale qu'il développe. Les questions sociales ou les besoins industriels auxquels la science se doit d'apporter des éléments de réponse ne se réduisent jamais à des verrous disciplinaires. Ils requièrent des interactions fortes entre toutes les disciplines, en n'oubliant bien sûr pas les sciences humaines et sociales. Le présent rapport apporte des contributions essentielles à ces problématiques.

Ouvrage collectif par nature, ce rapport est le fruit d'un travail d'équipe remarquable, ou plutôt de travaux d'équipes remarquables. Les femmes et les hommes constituant ces équipes ont su collaborer pour produire cet impressionnant rapport. Je tiens à en remercier vivement chacun et chacune.



Antoine PETIT
Président-directeur général du CNRS

SECTION 01

INTERACTIONS, PARTICULES, NOYAUX, DU LABORATOIRE AU COSMOS

Composition de la section

Raphaël GRANIER DE CASSAGNAC (président de section), Anne-Catherine LE BIHAN (secrétaire scientifique), Réza ANSARI, Olivier BOURRION, Jaime DAWSON, Aldo DEANDREA, Mohamed ELKHALDI, Beatriz JURADO APPRUZZESE, Élias KHAN, Thierry LAMY, Frédérique MARION, Iolanda MATEA, Elsa MERLE, Guillaume PIGNOL, Olivier SORLIN, Vincent TISSERAND, Antonio URAS, Benoît VIAUD, Isabelle WINGERTER-SEEZ.

Résumé

La section 01 s'intéresse à la physique de l'infiniment petit, en deça de l'échelle atomique. Elle englobe ainsi la physique nucléaire, l'étude des nucléons (et autres hadrons), la caractérisation des constituants les plus élémentaires de la matière (quarks, leptons, neutrinos) et l'étude de leurs interactions (électromagnétique, faible et forte). Le modèle standard des particules et de leurs interactions s'est vu admirablement complété par la découverte de sa clef de voûte, le boson de Higgs, en 2012. Le champ de la section 01 s'étend naturellement vers l'infiniment grand par deux liens essentiels. Primo, le scénario cosmologique du big bang relie l'Univers aujourd'hui observable aux plasmas

de particules élémentaires qu'il était aux origines, et dans lequel la gravitation, quatrième interaction fondamentale, joua un rôle essentiel. Secundo, diverses particules (chargées, photons, neutrinos...) nous parviennent de l'espace et nous renseignent sur les objets astrophysiques qui les créent. Sur ce front, la découverte en 2015 des ondes gravitationnelles, à laquelle plusieurs chercheurs de la section ont contribué, représente une avancée majeure. Elle élargit le champ de l'astrophysique multi-messagère, à la frontière des sections 01, 02 et 17, et donc des instituts IN2P3, INP et INSU. La section 01 couvre également une partie des applications sociétales envisageables à la physique des particules, essentiellement vers la santé et l'énergie.

Introduction

La section 01 est la plus grande division du Comité national, avec 436 chercheurs au bilan social du CNRS de 2016. Leur champ thématique est extrêmement vaste, allant de la physique nucléaire à la cosmologie, en passant par la physique des particules élémentaires et des astroparticules. Le cœur de leur métier est la physique fondamentale et expérimentale, mais le spectre des approches suivies s'ouvre sur les applications de la physique des particules dans la société, ainsi que sur des travaux plus théoriques. Ces ouvertures thématiques et méthodologiques font que la section 01 couvre une très grande variété de profils et d'activités. Au-delà du CNRS, ces recherches sont également pratiquées dans les universités ou grandes écoles au sein d'unités mixtes de recherche, ainsi qu'au CEA.

La section 01 admet des frontières naturelles avec les sections 02 et 17, comme le souligne le nombre important de candidatures communes aux concours. Si l'essentiel des développements théoriques afférents à nos disciplines est conduit par des chercheurs de la 02, une vingtaine de théoriciens émergent à la section 01, en particulier la quasi-totalité des physiciens nucléaires du CNRS. Une vingtaine de chercheurs théoriciens de la section 02 travaillent également dans des laboratoires à dominante expérimentale de l'IN2P3.

Par ailleurs, les programmes de cosmologie et d'astroparticules ont vu de nombreux chercheurs des sections 01 et 17 collaborer sur des programmes expérimentaux (Planck, HESS, Euclid, CTA, SVOM...), apportant leurs expertises variées et complémentaires. L'émergence d'une astronomie multi-messagère, renforcée par la récente découverte des ondes gravitationnelles, intensifiera encore ces collaborations. Il paraîtrait opportun, dans ce contexte, que l'IN2P3, l'INP et l'INSU parlent d'une seule voix, et la création d'une CID « astroparticules

et cosmologie » serait bénéfique à l'avenir de ces disciplines.

Une interface naturelle existe également avec la radiochimie, avec une vingtaine de chercheurs de la section 13 présents dans des laboratoires de l'IN2P3.

Sur le plan de l'emploi, il est à noter que le mandat actuel voit une baisse drastique du nombre de recrutements, due à plusieurs facteurs (dont le nombre de départs en retraite ne saurait être la seule justification), avec un minimum absolu de sept recrutements en 2019, contre une moyenne supérieure à douze sur les années 2009-17. Dans le même temps, le vivier de candidats ne semble pas avoir baissé. Cette chute n'a malheureusement pas été compensée par des recrutements dans les universités ou au CEA, loin s'en faut.

Dans ce contexte de disette, la section s'est élevée contre le coloriage à la fois thématique et géographique de la quasi-totalité de ces postes, qui lui semble nuire à la diversité des recrutements, écarter *de facto* d'excellents candidats, et laisser peu de place aux profils résolument originaux qui font la force à long terme d'un système de recherche.

Dans la suite, les activités de la section sont décrites en trois grandes parties, dans l'esprit du découpage actuel de l'institut en directions adjointes thématiques, et par ordre d'apparition historique : physique nucléaire, physique des particules, cosmologie et astroparticules. Cette division ne doit pas occulter les nombreux ponts qui existent entre les différentes disciplines : rôle des réactions nucléaires dans les phénomènes astrophysiques, variété des particules messagères du cosmos, physique hadronique à la frontière du nucléaire et des hautes énergies...

Nombre des chercheurs de la section 01 travaillent sur de très grands instruments, et la dernière partie de ce rapport évoque rapidement les recherches et développements nécessaires à l'avancement de nos thématiques, en particulier sur les accélérateurs et le numérique.

I. Physique nucléaire

La physique nucléaire ambitionne de comprendre la structure et la dynamique de la matière dans ses états subatomiques denses, principalement les noyaux mais également les astres extrêmes que sont les étoiles à neutrons. L'expertise qui en découle l'amène à jouer un rôle important dans les questions à forts enjeux sociétaux que sont l'énergie nucléaire et les applications pour la santé.

A. Structure et dynamique nucléaires

Les physiciens nucléaires cherchent à comprendre l'organisation des protons et des neutrons dans les noyaux atomiques. Au niveau fondamental, l'interaction forte est responsable de la cohésion de ces nucléons dans les noyaux, dans lesquels les interactions électromagnétique et faible autorisent aussi des recombinaisons radioactives. L'interaction gravitationnelle joue aussi un rôle dans l'étude des étoiles à neutrons. Le noyau atomique est ainsi un système dans lequel un nombre fini de composants interagit par au moins trois des quatre interactions fondamentales. Il en résulte une vaste et fascinante phénoménologie nucléaire (vibration ou rotation quantique, superfluidité, compression ou excitations dipolaires, transitions de formes ou de phases, agrégats nucléaires, noyaux à halo...) et c'est un immense défi pour les approches théoriques que d'en faire une description complète, *a fortiori* avec précision.

L'essor des recherches modernes en physique nucléaire expérimentale repose principalement sur deux axes : les nouveaux faisceaux radioactifs ou stables de haute intensité, couvrant un large spectre en énergie (de quelques keV au GeV par nucléon), en masse, et en rapport N/Z , et les détecteurs de plus en plus

performants et compacts, éventuellement utilisés en combinaison avec des spectromètres.

Le dynamisme dans le domaine des accélérateurs pour la physique nucléaire est mondial et une nouvelle génération d'installations se prépare avec en France SPIRAL2 (Phase 1) et ALTO-RIB, en Europe avec FAIR (Allemagne), SPES et FRIBs (Italie), HIE-ISOLDE (CERN), ELI-NP (Roumanie), et hors de l'Europe avec RIBF (Japon), DRIBs (Russie), ARIEL (Canada), FRIB (États-Unis), ainsi que RAON-RISP (Corée du Sud), HIAF (Chine) et IThemba-Labs (Afrique du Sud). Certaines de ces installations sont déjà en fonctionnement et les équipes françaises y sont présentes.

Parmi les détecteurs, l'IN2P3 est à la pointe de la technologie avec notamment le détecteur gamma AGATA composé de cristaux de germanium segmentés qui permettent une excellente résolution en énergie et un *tracking* des photons, le détecteur gamma PARIS avec une résolution temporelle excellente et une efficacité inégalée à haute énergie, la cible active ACTAR-TPC combinée à une chambre à projection temporelle, le détecteur de particules chargées INDRA et son évolution vers FAZIA, ainsi que MUST2 et son évolution vers GRIT.

Les approches théoriques en physique nucléaire sont quant à elles entrées dans une nouvelle ère avec le développement de forces dérivées directement de la chromodynamique quantique (QCD) et de méthodes avancées permettant de résoudre le problème à n corps, tout en gardant un contrôle sur les incertitudes théoriques. Ce cadre ouvre la voie à une profonde compréhension des interactions nucléaires (par exemple du terme à trois corps), de leur rôle, et des liens avec les étoiles à neutrons. Ainsi les méthodes dites *ab initio* ont récemment décrit avec succès les noyaux ouverts, situés en milieu de couches, ce qui constitue une avancée considérable en matière d'universalité. Les physiciens français ont largement contribué à ces avancées.

Les deux autres approches principales en théorie nucléaire sont le modèle en couches et les théories de la fonctionnelle de densité. Des progrès importants ont été obtenus dans

cette dernière voie pour décrire de manière unifiée et précise une très grande variété de phénomènes impliquant des noyaux légers (comme les *clusters*) et des noyaux lourds (comme les spectres rotationnels ou la fission). Par ailleurs, les calculs de modèle en couches sont désormais accessibles à grande échelle, permettant une description très précise des noyaux, y compris ceux éloignés de la magicité.

Ces trois grandes classes d'approches en théorie nucléaire deviennent de plus en plus perméables entre elles, ouvrant des perspectives vers une théorie nucléaire unifiée.

Enfin, la physique nucléaire est également liée à de nombreuses disciplines puisqu'elle partage des concepts théoriques avec la matière condensée, la physique atomique et la chimie quantique.

Parmi les événements majeurs, la récente découverte de la fusion de deux étoiles à neutrons par l'émission afférente d'ondes gravitationnelles a démontré, de par le rayonnement de la kilonova associée et son décalage vers le rouge en fonction du temps, que des noyaux du processus *r* (en particulier les lanthanides) y sont produits en très grande quantité. Le rôle de la physique nucléaire pour décrire finement le phénomène est multiple : comprendre la nucléosynthèse par capture de neutrons, ce qui implique des mesures de masses, de temps de vie, de sections efficaces de captures de neutrons pour des noyaux très exotiques, l'évolution de la structure en couches des noyaux, ainsi que leurs propriétés de fission. Des équipes de l'IN2P3 sont impliquées dans des expériences dédiées aux mesures de masses, de durées de vies et d'évolution de structure nucléaire loin de la stabilité auprès d'ISOLDE/CERN, de RIKEN, ainsi que dans des projets de compréhension et modélisation de la fission avant et après la scission, grâce aux installations LICORNE et VAMOS en France et Cryring et R³B à FAIR.

Les propriétés des noyaux atomiques sont également essentielles pour comprendre comment les éléments sont synthétisés au cœur d'étoiles de combustion lente ou explo-

sive. On peut citer la mesure directe de la réaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ avec STELLA, l'étude de la réaction $^{15}\text{O}(a,g)^{19}\text{Ne}$ à l'aide de MUGAST-AGATA-VAMOS qui permet aux sursauts X de se développer, et des mesures utilisant les faisceaux stables d'ALTO liées à l'étude de la nucléosynthèse dans les étoiles massives ou dans les novae.

L'équation d'état de la matière nucléaire influe sur des observables accessibles via la détection des ondes gravitationnelles ainsi que sur la masse et le rayon des étoiles à neutrons. Des études théoriques et expérimentales sont menées dans différents laboratoires de l'IN2P3 à ce sujet. Les équipes sont notamment fortement impliquées dans l'évolution du détecteur INDRA vers FAZIA, dédié en particulier à des campagnes d'expériences menées au Grand accélérateur national d'ions lourds (GANIL).

Une des questions encore sans réponse en physique nucléaire porte sur les limites de stabilité des noyaux par rapport à l'interaction forte, quand ils se comportent comme un système quantique ouvert, couplé aux états du continuum. Il en résulte la formation de halos de neutrons ou d'états géants tels que les états Effimov en cours d'étude dans le ^{18}B à RIKEN, ou la formation d'agrégats de nucléons. Les isotopes de Be riches en neutrons en sont un exemple et peuvent être décrits comme des quasi-molécules formées de deux noyaux de ^4He autour desquels orbitent les neutrons en excès. L'étude de la brisure de symétrie miroir dans des systèmes comme ^{36}S , ^{36}Ca ou ^{16}N , ^{16}F au GANIL permet d'avancer sur la compréhension de la violation de la symétrie de charges par la force nucléaire.

Enfin, l'étude des noyaux « superlourds » par des équipes de l'IN2P3 vise à comprendre comment synthétiser des éléments à très grand nombre de nucléons sans qu'ils fissionnent spontanément, à étudier leurs propriétés et ainsi mieux modéliser le rôle des fermetures de couches nucléaires dans leur stabilisation. Les recherches à l'IN2P3 ont lieu auprès des installations de Dubna, d'Argonne et prochainement de S3 au GANIL avec la spectroscopie des isotopes $Z = 102-105$ par conversion élec-

tronique, décroissance gamma et par spectroscopie laser pour en déterminer le moment magnétique et le rayon de charge.

Parmi les chercheurs de la 01, la section recense plus de 70 expérimentateurs et une petite dizaine de théoriciens travaillent sur ces aspects fondamentaux de physique nucléaire.

B. Énergie nucléaire

La France, avec ses 80 % d'énergie électrique d'origine nucléaire, reste une exception. Dans la continuité des lois Bataille (1991 et 2006), un rapport rendu au gouvernement en 2015 par le CEA, en collaboration avec le CNRS, l'IRSN et les industriels, traite des systèmes nucléaires et du cycle du combustible (amont et aval) et donne les orientations prioritaires pour « la gestion durable des matières nucléaires » et la sûreté nucléaire des installations.

Pour répondre à ces priorités, le CNRS est un acteur majeur du programme « nucléaire, énergie, environnement, déchets, société » (NEEDS). Les axes de recherches portés par les physiciens de l'IN2P3 se situent dans les systèmes nucléaires et leur déploiement. Les réacteurs de quatrième génération envisagés sont les réacteurs rapides refroidis au sodium (RNR-Na), les réacteurs rapides à sels fondus (MSFR), et les réacteurs pilotés par accélérateur (ADS).

Comme les bases de données nucléaires concernant les spectres neutroniques rapides sont incomplètes, les mesures de sections efficaces et de production de particules auprès d'installations nucléaires (IRMN, SPIRAL-II/NFS, Licorne, GSI, CERN nTOF, ILL) sont indispensables pour simuler avec des incertitudes de plus en plus réduites les paramètres de fonctionnement des cœurs nucléaires et conduire les analyses de sûreté (puissance résiduelle...). Ces mesures permettent aussi d'améliorer l'évaluation des inventaires des combustibles usés afin d'en optimiser la gestion.

Concernant la gestion des déchets, les efforts concernant les ADS, dans un cadre européen (projets GUINEVERE et FREYA puis

projets MYRTE et MYRACL), à la fois en physique expérimentale des réacteurs sous-critiques et en physique des accélérateurs de haute intensité, devraient voir leur aboutissement dans la décennie à venir, par la construction du démonstrateur MYRRHA (Multi-purpose HYbrid Research Reactor for High-tech Applications). Parallèlement, des équipes du CNRS (à l'INC) travaillent sur la séparation des actinides en vue de leur transmutation ou de leur stockage ainsi que sur la problématique du retraitement et des matériaux pour les sels fondus.

Pour les systèmes de génération IV, les MSFR, réacteurs à combustible liquide très innovants quant à la gestion du combustible (cycle Th/U en fluorures et U/Pu en chlorures), constituent un des axes de développement dont le CNRS est leader en Europe (projets SAMOFAR puis SAMOSAFER). Les études portent sur la sûreté de ces systèmes avec le développement d'outils de simulation adaptés, les possibilités d'incinération des actinides des réacteurs actuels et les capacités de suivi de charge, en adéquation avec les énergies renouvelables intermittentes.

Pour la stratégie globale de renouvellement, d'extension ou d'arrêt du parc électronucléaire, des équipes de l'IN2P3 travaillent indépendamment des industriels (développement des codes MURE, CLASS) sur des scénarios énergétiques de déploiement, de développement ou d'arrêt de filières en prenant en compte les ressources en matières premières ainsi que les impacts sociétaux et économiques.

Une dizaine de chercheurs de la 01 travaillent exclusivement sur ces aspects d'énergie nucléaire.

C. Nucléaire et santé

Le CNRS est très impliqué dans les recherches en lien avec la santé. L'IN2P3 contribue significativement à cet effort avec 11 laboratoires et environ 120 équivalents temps plein impliqués en 2018, dont 17 chercheurs de la 01.

Les équipes mènent des activités très variées ayant comme point commun l'utilisation des rayonnements ionisants afin d'observer et de comprendre le vivant, ou dans une perspective de thérapie, par exemple pour la lutte contre le cancer. Ces activités s'appuient sur des compétences uniques héritées des recherches sur les processus élémentaires : modélisation des interactions fondamentales entre constituants de la matière et milieu biologique, production de faisceaux et de radionucléides, et instrumentation associée pour la détection (imagerie) et le contrôle des irradiations (dosimétrie). Plusieurs équipes de biologistes ont récemment rejoint des laboratoires de l'IN2P3 (CENBG à Bordeaux, IP2I à Lyon, LPC à Clermont...) et renforcent l'expertise disponible pour mener des recherches pertinentes en lien avec la santé.

Ces expertises ont permis de contribuer au développement de codes de simulation de référence, depuis la simulation mécaniste des interactions élémentaires physiques, physico-chimiques et chimiques avec le vivant (comme le code ouvert Geant4-DNA intégré à Geant4, ou encore NaNoX) jusqu'à la planification de traitement (code ouvert GATE) dans plusieurs centres de radio/hadronthérapie en Europe. En parallèle, les équipes et services de l'IN2P3 sont impliqués dans le développement de plateformes d'irradiation représentant une offre unique en France notamment pour l'irradiation d'échantillons biologiques et/ou la production de radionucléides (citons AIFIRA et ANAFIRE à basse énergie pour la radiobiologie, ARRONAX et CYRCé aux énergies intermédiaires jusqu'aux études pré-cliniques, GANIL aux plus hautes énergies et le futur cyclotron d'ARCHADE pour la hadronthérapie). Les équipes et services sont également impliqués dans l'imagerie, depuis l'imagerie élémentaire chimique par faisceaux d'ions (par exemple pour l'étude des bio-verres ou encore l'étude des maladies neuro-dégénératives) jusqu'à l'imagerie multi-modale (CT, SPECT, PET...) et à haute sensibilité (par exemple à trois gammas) pré-clinique et clinique (par exemple lors de l'extraction des tumeurs). Cette expertise instrumentale se retrouve également pour le contrôle des faisceaux (de pho-

tons, de protons...) et de la dose délivrée lors des traitements (notamment pour l'étude des nouveaux modes de fractionnement de dose spatiaux ou temporels).

Au vu de la variété des activités menées, l'IN2P3 doit aujourd'hui renforcer ses liens de collaboration avec les autres instituts du CNRS autour de la santé. Ce renforcement lui permettra de contribuer à la structuration de la recherche à l'échelle nationale en lien avec les autres organismes acteurs du domaine. Ce positionnement devrait alors permettre de répondre conjointement et avec pertinence aux futures sollicitations et appels à projets qui permettront d'assurer visibilité et pérennité aux activités des équipes et services en lien avec la santé.

II. Physique des particules

À près de cinquante ans, le modèle standard (MS) de la physique des particules est une théorie bien établie, étayée par de nombreux tests expérimentaux. Pour autant, il ne permet pas de rendre compte de pans majeurs de la réalité physique, comme la nature de la matière noire ou l'asymétrie entre matière et antimatière observées dans l'Univers. Les efforts de la discipline se concentrent donc sur la recherche d'indices pour dépasser le MS, sur plusieurs fronts. Les expériences à la frontière de l'énergie permettent de mesurer directement les propriétés du boson de Higgs et de rechercher de nouvelles particules, tandis que celles à la frontière de l'intensité permettent des mesures de précision, l'étude des processus rares. Par ailleurs, mieux comprendre l'interaction forte et le secteur des neutrinos sont deux enjeux majeurs pour l'assise du MS.

Les années qui viennent verront l'exploitation d'équipements récents cohabiter avec la conception des prochains instruments. Pour maintenir la place importante tenue dans ce domaine par la France, un soutien à la R&D, quelle que soit l'échelle des projets, est plus que jamais capital.

Pour exposer cette recherche, les paragraphes suivants empruntent leur titre aux quatre GDR de la discipline.

A. Chromodynamique quantique

À l'échelle subnucléaire, la chromo-dynamique quantique, QCD, décrit l'interaction des quarks et des gluons. Cette théorie quantique des champs est la formulation la plus élémentaire de l'interaction forte qui assure la cohésion des noyaux. Selon les énergies, les distances ou les densités mises en jeu, la QCD conduit à une grande variété de phénomènes, plus ou moins prédictibles.

À basse énergie et à longue distance, quarks et gluons sont confinés dans des hadrons, dont les plus communs sont les protons et les neutrons. L'étude de leur structure est une activité intense, essentiellement menée au Jefferson laboratory, aux USA. L'enjeu essentiel ici est de comprendre comment leurs constituants confèrent leur propriété aux nucléons, grâce aux fonctions de distribution de partons généralisées, qui intègrent les corrélations entre position et impulsion des constituants. Avec la récente montée en puissance de l'accélérateur, de 6 à 12 GeV, des résultats importants émergent, tels que : l'augmentation du rayon du proton avec la diminution de l'impulsion des quarks (les quarks de valence sont plutôt concentrés au centre du nucléon), de premières extractions du moment orbital, et l'estimation de forces de pression colossales au sein du nucléon. Deux équipes sont très impliquées sur ce programme, une à l'IPN d'Orsay, une au DPhN du CEA.

Dans ces deux laboratoires, deux autres équipes contribuent à des programmes complémentaires de physique hadronique, au CEA sur COMPASS (CERN) et à Orsay sur HADES (GSI). Ce dernier se penche sur le comportement de la matière hadronique à

température modérée (50-100 MeV), dont l'étude se poursuivra auprès du futur laboratoire FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, au GSI). La participation d'équipes françaises aux différentes expériences qui seront déployées à FAIR, en particulier PANDA et CBM, n'est pas actée.

À haute énergie et courte distance, les hadrons ne sont plus confinés et se dissolvent en un plasma de quarks et de gluons. Cet état de la matière, essentiellement découvert au Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC, Brookhaven, USA) dans les années 2000, est aujourd'hui étudié au LHC. La montée en énergie d'un facteur quinze a permis d'utiliser de nouvelles sondes et d'observer de nouveaux phénomènes. Elle a surtout révélé, dès les premiers jours du LHC, que les collisions proton-proton les plus violentes revêtaient des caractères similaires (collectivité, étrangeté...) à ceux observés dans les collisions d'ions lourds. Dès lors, la question de l'émergence de la complexité, des collisions les plus élémentaires aux plus complexes est devenue centrale. La France est très impliquée dans ALICE, l'expérience dédiée à l'étude du plasma de quarks et de gluons, avec 24 physiciens CNRS qui s'intéressent, entre autres, à la coalescence du charme et à l'augmentation de l'étrange (en particulier dans les collisions proton-proton violentes). Deux petits groupes sont aussi extrêmement visibles dans les expériences CMS et LHCb et y étudient des sondes difficiles d'accès pour l'expérience ALICE (jets, bosons électro-faibles, bottomonia pour CMS, descente en énergie en mode cible fixe pour LHCb).

Le programme de physique accessible aux collisions d'ions lourds au LHC est démontré à l'horizon de 2030 (run 4). Au-delà, l'avenir de la discipline et des physiciens est une question ouverte, avec des intérêts exprimés pour un futur collisionneur électron-ion aux USA (EIC), un futur collisionneur au CERN (FCC)... À plus court terme ou plus basse énergie, la participation à d'autres programmes n'est pas exclue (NA60+, J-PARC, AFTER...).

B. Frontière en énergie

Quelques années après la découverte du boson de Higgs par les collaborations ATLAS et CMS en 2012, l'enjeu de la discipline est de caractériser en détail ce boson, seule particule élémentaire scalaire découverte à ce jour. L'objectif est de déterminer s'il s'agit du boson de Higgs prédit par le MS, d'un boson de Higgs composite ou d'un boson faisant partie d'un secteur étendu, comme prédit en supersymétrie par exemple.

Après la brisure spontanée de symétrie amenée par le champ de Higgs, les couplages du boson sont de deux natures : couplage proportionnel au carré de la masse des bosons vecteurs, et couplage de Yukawa avec les fermions (quarks et leptons) proportionnel à leur masse. Après sa découverte dans des modes bosoniques, ses couplages aux leptons *tau*, quarks *top* et quarks *bottom* viennent d'être observés au cours du run 2 du LHC, en 2018 et 2019. Son couplage à la troisième famille de constituants élémentaires est ainsi confirmé, tandis que celui à la deuxième famille doit encore être établi. L'observation de sa désintégration en muons est attendue dans les prochaines années, tandis que celle en paires de quarks *charm* est plus délicate. L'ensemble des mesures offre pour le moment un panorama très cohérent. La meilleure précision est obtenue sur le couplage dans le canal ZZ et atteint 10%. Au terme du projet de haute luminosité du LHC (HL-LHC), vers mi-2030, il est attendu que les précisions atteindront des valeurs de 2 à 5%.

La recherche de modes de désintégration rares, vers des mésons ou des particules invisibles, est nécessaire pour déceler des signes directs de nouvelle physique. Le boson de Higgs pourrait en effet se coupler à de la matière noire (désintégrations vers des candidats *WIMP*, production associée de type *mono-Higgs*), ou jouer un rôle dans des mécanismes de génération de masse des neutrinos. De façon complémentaire, les distributions cinématiques de ses produits de désintégrations doivent être étudiées, ainsi que celles de ses

modes de production, toujours dans l'optique de déceler des déviations aux prédictions du MS. Ces recherches gagneront en ampleur au cours du run 3 du LHC, prévu de 2021 à 2023.

Si l'étude de ses désintégrations en bosons de jauge électrofaibles a permis d'exclure qu'il soit de nature purement pseudoscalaire, $J^P = 0^-$, il n'est pas exclu que des termes violant la symétrie charge-parité (CP) apparaissent dans ses couplages fermioniques, et qu'il soit un mélange d'états CP pair et impair, $J^{CP} = 0^{++}$ et $J^{CP} = 0^{-+}$. Une telle découverte signifierait la présence d'un nouveau type de violation de CP, diagonale en saveur, ne faisant pas appel au traditionnel mélange. La violation de CP apparaîtrait dans les termes généralisés des couplages de Yukawa des fermions et ne dépendrait pas d'un modèle de nouvelle physique donné.

La nature quantique et relativiste du potentiel de Higgs doit être confirmée ; son auto-couplage doit être mis en évidence. Des événements di-Higgs dus au couplage trilineaire sont d'ores et déjà recherchés et la limite supérieure obtenue sur la section efficace combinée se rapproche d'une valeur dix fois supérieure à la valeur prédite, laissant présager une observation au HL-LHC.

Enfin, la cohérence globale avec le MS doit continuer à être étudiée. Son lien privilégié avec le quark *top*, particule la plus lourde du MS, doit être scruté. La mesure de sa masse, mise en regard de celle du *top*, permet de contraindre la métastabilité du vide électrofaible. L'unitarité de la diffusion des bosons vecteurs, polarisés longitudinalement car massifs, doit être vérifiée. La non-divergence de ces sections efficaces dépend du boson de Higgs.

Un très vaste espace des paramètres supersymétriques a d'ores et déjà été balayé, allant parfois jusqu'à exclure des masses de squarks *stops* dites naturelles. Afin de ne laisser échapper aucun indice, les recherches gagnent en complexité et s'attachent à caractériser des scénarios de plus en plus divers. Les recherches s'orientent ainsi vers la recherche de particules à très long temps de vie, ou encore caractérisées par des signatures atypiques :

apparition de jets émergents, photons retardataires, traces évanescentes, etc. Ces signatures sont par exemple attendues lorsque le gravitino est la particule super-symétrique la plus légère ou lorsque les masses des particules super-symétriques se désintégrant sont très proches (scénarios dits comprimés).

Avec respectivement 65 et 28 chercheurs de la section, les équipes françaises des deux expériences ATLAS et CMS continuent à être fortement impliquées dans ces recherches de premier plan et contribuent activement à la mise à niveau des détecteurs pour la phase de haute luminosité du LHC. À plus long terme, des projets tels que l'ILC, CLIC et FCC envisagent de caractériser le boson de Higgs avec des précisions accrues, notamment de mesurer sa largeur totale indépendamment de ses modes de désintégration, ainsi que de poursuivre la recherche de signes de nouvelle physique.

C. Frontière en intensité

Les expériences à la frontière de l'intensité de la physique des particules visent à découvrir des effets nouveaux, au-delà du MS, soit en mesurant très précisément certains processus, espérant trouver une petite déviation par rapport à la prédiction du MS, soit en détectant des événements très rares qui violeraient explicitement une symétrie du MS. Dans ce domaine, plusieurs anomalies pressantes et récemment observées dans les désintégrations rares des hadrons beaux et dans la mesure du moment magnétique du muon et du rayon du proton attendent une explication. Les théoriciens, en particulier français, contribuent de façon essentielle à ce programme par des calculs de précision du MS et par l'étude des signatures de théories au-delà du MS.

La communauté expérimentale française se déploie sur deux approches complémentaires. La première exploite des grands équipements, en premier lieu le collisionneur LHC mais aussi Super-KEKB et des expériences sur cible fixe.

Ces grandes expériences collectent des lots de données colossaux qui sont exploités pour étudier différents aspects de la physique de la saveur, c'est-à-dire les processus impliquant les quarks de 2^e et 3^e générations. La seconde approche construit et exploite des expériences dédiées à des mesures très spécifiques, particulièrement sensibles à la nouvelle physique, en particulier les moments dipolaires électrique et magnétique des particules, et les processus violant la conservation de la saveur leptonique (LFV).

Les principales expériences sur collisionneur sont LHCb au CERN, depuis 2011 avec un premier *upgrade* en 2019-2020, et Belle II au Japon, dans laquelle l'IN2P3 est engagée officiellement depuis l'été 2017, avec une poignée de chercheurs de la 01, pour 24 sur LHCb. Ces derniers étudient le lot sans précédent de hadrons beaux et charmés produits (dans toute leur diversité) au LHC, alors que ceux de Belle II bénéficient de l'environnement relativement peu bruyant des collisions e^+e^- de Super-KEKB. Ils permettront de clarifier la nature des anomalies intrigantes observées dans certaines désintégrations rares des hadrons beaux via des mesures indépendantes. C'est une priorité unanime pour la communauté de la physique des saveurs dans les cinq à dix prochaines années. Au-delà de 2030, après un second upgrade, LHCb aura une position unique pour exploiter le potentiel du HL-LHC. Notons que la communauté française, faute de ressources, est absente de certains projets : g-2 à FNAL (Chicago) ; NA62 et KLEVER au CERN, KOTO au Japon et KLOE en Italie, pour la recherche de désintégrations rares de kaons (entièrement négligées jusqu'ici) ; BES III en Chine pour l'étude des mésons charmés. Par ailleurs, des physiciens de l'IN2P3 s'intéressent à la préparation d'expériences basées sur les collisionneurs (CODEX-b au LHC) et également de faisceaux sur cibles fixes (SHIP au SPS du CERN) pour la recherche de nouvelles particules à longue durée de vie. En complément des recherches d'événements rares menées auprès des collisionneurs de particules, certaines expériences très spécifiques, réalisant des tests de grande précision des interactions fondamentales, ont

un haut potentiel de découverte de phénomènes nouveaux. En particulier, la recherche française est motrice dans la mesure du dipôle électrique du neutron avec une participation importante dans le projet n2EDM au PSI (Suisse). Il s'agit d'un test de précision de l'invariance par renversement du sens du temps, puisque l'existence d'un dipôle électrique non nul révélerait une violation de cette symétrie. La France est aussi engagée dans le projet COMET au Japon pour rechercher le processus de LFV : muon en électron mais elle est absente des expériences Mue2 du FNAL et MEG et Mu3e, au PSI. Enfin, la France est impliquée dans des mesures de précision des désintégrations bêta au GANIL.

Les stratégies françaises à long terme, auprès des grands collisionneurs, devraient impliquer le collisionneur linéaire international (ILC), et/ou le futur collisionneur circulaire (FCC). La mesure améliorée des paramètres électrofaibles pourrait d'abord être fournie par l'ILC au début des années 2030. Le projet FCC prévoit un nouvel accélérateur de 100 km de circonférence au CERN à l'horizon 2035, après l'exploitation du LHC. Dans une première phase, ce serait un collisionneur e^+e^- à haute luminosité pour poursuivre l'étude approfondie de l'échelle électrofaible aux quatre seuils en énergie : pic du Z, paires de bosons W, de H et de quarks *top*. Notons que la communauté chinoise présente un projet similaire, le CEPC, qui pourrait voir le jour d'ici dix à quinze ans.

D. Neutrinos

En vingt ans, l'étude intensive des oscillations de neutrinos a établi solidement le modèle à trois saveurs, en mesurant à quelques pour cent près les écarts entre les carrés de leurs masses et tous les angles de mélange (θ_{12} , θ_{23} et θ_{13}) de la matrice U_{PMNS} qui relie les états de masse et les états de saveur des leptons, et décrit l'oscillation des neutrinos. Ni le schéma de mélange des saveurs ainsi apparu ni la faiblesse des masses des neutrinos

ne sont pour autant compris. De nombreuses expériences de précision se préparent pour répondre à plusieurs interrogations. Les leptons fournissent-ils une nouvelle source de violation de CP? Les neutrinos sont-ils des fermions de Dirac ou de Majorana? Quelle est la hiérarchie de masse (HM)? Y a-t-il d'autres leptons neutres? Une grande variété d'approches expérimentales est nécessaire, avec une forte contribution française dans tous les secteurs.

Une grande précision peut être atteinte sur plusieurs paramètres en mesurant à longue distance l'oscillation de **neutrinos produits par des accélérateurs**. Entre autres, l'octant de θ_{13} , la HM ou δ_{CP} (phase de U_{PMNS} pouvant violer CP) pourraient être déterminés pour la première fois. Deux expériences sont en cours : T2K (Japon) à laquelle la France participe, et Nova (États-Unis). Leurs données suggèrent une HM normale et une violation de CP de grande ampleur. Si cette tendance est confirmée, la prochaine jouvence de T2K (de 2021 à 2026) devrait permettre une détermination à mieux que trois écarts-types.

À plus long terme, ces recherches seront dominées par deux nouvelles expériences : HyperK au Japon et DUNE aux États-Unis. La France participe aux deux. L'immense volume cible de leurs détecteurs lointains leur assure une place de choix dans d'autres domaines, comme pour l'étude des désintégrations de nucléons ou des neutrinos astrophysiques. Pour gagner encore en précision, des groupes français étudient la possibilité d'un faisceau ultra intense issu de la European Spallation Source (Suède).

La compréhension des interactions neutrino-noyau limite les précisions atteignables. Entre autres, elle complique la détermination des flux initiaux. En plus du développement de détecteurs proches, NA61/SHINE (au SPS du CERN) et ENUBET qui mise sur l'instrumentation du tunnel où sont produits les neutrinos d'accélérateurs, sont deux approches suivies en France face à ce problème.

Comme pour ces expériences sur accélérateurs, les effets touchant les neutrinos lors d'un long parcours dans la matière permettront au

télescope sous-marin ORCA de rechercher la HM, en mesurant des neutrinos atmosphériques. La France participe actuellement à sa construction.

L'expertise acquise sur les **neutrinos issus de centrales nucléaires** grâce au succès de Double Chooz permet à la France une contribution conséquente à JUNO, une expérience de grande taille qui exploitera des antineutrinos de réacteur à 50 km. Elle permet une approche indépendante des effets de matière pour mesurer la HM et vise une sensibilité meilleure que trois écarts-types vers 2028.

Les expériences d'oscillation citées ci-dessus permettront aussi de contraindre l'unitarité de U_{PMNS} via un grand panel d'observables. Notons que ORCA et DUNE poursuivront les travaux pionniers d'OPERA, désormais achevés, sur l'apparition $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$.

L'hypothèse d'un **neutrino stérile** d'environ 1 eV, motivée par des anomalies observationnelles persistantes, pourrait être tranchée très prochainement. Parmi les nombreuses expériences cherchant une oscillation nouvelle, STEREO et SoLid déploient depuis 2018 deux technologies différentes (scintillateur liquide pour l'une, plastique pour l'autre) à quelques mètres de réacteurs expérimentaux.

La première observation par COHERENT de la diffusion élastique cohérente neutrino-noyau (2017) fournit une nouvelle observable sensible à la nouvelle physique à basse énergie ($E_{\nu} \lesssim 1$ MeV) et une nouvelle façon de détecter des neutrinos. Les projets à venir emploient souvent des techniques cryogéniques, tels RICOCHET, NU-CLEUS ou BASKET, attendus à l'ILL ou à Chooz.

Pour observer la double décroissance β sans émission de neutrinos et tester l'hypothèse que ces derniers soient des **fermions de Majorana**, les groupes français travaillent sur deux technologies. La trajecto-calorimétrie de NEMO est à nouveau à l'œuvre dans le démonstrateur SuperNEMO, en cours de mise en route. Le potentiel de la bolométrie cryogénique, qui maximise résolution en énergie et rejection des bruits de fond, a été confirmé par

l'expérience CUORE, ouvrant la voie à CUPID. Elle doit compter parmi les expériences les plus sensibles de la prochaine décennie, à la suite des résultats prometteurs des premiers prototypes.

Une nouvelle fenêtre d'observation unique s'est ouverte sur les **neutrinos d'origine astrophysique**. Ceux produits lors de supernovae seront recherchés par toutes les expériences de grande taille citées ci-dessus. Le projet KM3NeT, dans la continuité de l'expérience ANTARES, recherchera quant à lui des neutrinos de très haute énergie dans le ciel de l'hémisphère sud. La France participe à la construction de son détecteur dédié ARCA, dont une première version à 24 lignes devrait être opérationnelle d'ici environ deux ans. Le détecteur complet (230 lignes) verra le jour en milieu de décennie et sera l'un des outils de l'astrophysique multi-messagère. Par ailleurs, nos connaissances sur le fonctionnement du Soleil pourraient être complétées très prochainement par l'expérience Borexino. En prise de données jusqu'en 2020, elle cherchera à détecter les neutrinos produits par le cycle carbone-azote-oxygène, après être parvenue depuis 2007 à mesurer ceux des autres cycles dans toute leur gamme d'énergie pour confirmer le scénario d'oscillation MSW-LMA en mesurant la transition vide-matière.

Les expériences de physique des neutrinos requièrent des détecteurs très performants. Gagner en précision est un défi permanent. Les groupes français se doivent de répondre par de nombreux projets de R&D détecteurs, grâce au soutien de nos instituts. Dans le périmètre de la 01, une trentaine de chercheurs se dévouent à cette physique, souvent impliqués dans plusieurs projets d'échéances variées.

Nous soulignons enfin l'importance des travaux théoriques menés en France, tant sur la physique du neutrino en elle-même que pour la détermination d'informations indispensables aux mesures (par exemple, le flux avant oscillation).

III. Cosmologie et astroparticules

La cosmologie s'attache à rendre compte de la genèse, du contenu et de l'évolution de l'Univers. Elle s'appuie sur un modèle standard, dit Λ_{CDM} , qui s'est affiné ces vingt dernières années avec l'analyse de données observationnelles variées. Il recèle cependant trois énigmes majeures de la physique contemporaine : la nature de la phase d'inflation prévalant dans l'Univers primordial, la nature de la matière noire, cinq fois plus abondante que la matière ordinaire mais ne se manifestant qu'à travers ses effets gravitationnels, et la nature de l'énergie noire, composante responsable de l'expansion accélérée de l'Univers. Un vaste programme expérimental et théorique dans lequel l'IN2P3 est très impliqué s'efforce de lever le voile sur ces énigmes.

En parallèle, le domaine de la physique des astroparticules vise à exploiter différents messagers cosmiques pour faire progresser à la fois la physique fondamentale et notre compréhension de l'Univers. L'IN2P3 participe ardemment à un ensemble d'expériences de détection de rayons gamma, rayons cosmiques chargés, neutrinos de haute énergie, ondes gravitationnelles. Séparément et conjointement, ces messagers permettent d'explorer les phénomènes les plus violents et les conditions les plus extrêmes de l'Univers. Émergeant il y a quelques décennies, ce domaine s'est imposé comme une branche de la discipline incontournable pour compléter les expériences en laboratoire.

Environ 45 et 70 chercheurs de la O1 dédient leur recherche à la cosmologie (y compris la recherche de matière noire) et aux astroparticules, respectivement.

A. Matière noire

L'estimation de la masse dynamique des galaxies (interagissant gravitationnellement), déduite par exemple des mesures des courbes

de rotation, est près d'une dizaine de fois supérieure à la masse visible, celle des étoiles et du gaz. Il faut faire appel à une matière exotique, dominant largement la densité de matière ordinaire, pour rendre compte des observations cosmologiques. Cette matière interagirait avec la matière ordinaire presque exclusivement à travers la gravitation, rendant sa détection extrêmement difficile. Rappelons également que de nombreuses théories au-delà du MS prédisent l'existence de nouvelles particules qui pourraient constituer la matière noire cosmologique. C'est le cas en particulier des théories super-symétriques, avec de bons candidats dans la catégorie des WIMPs (*weakly interacting massive particles*).

Les physiciens poursuivent activement la recherche de ces particules, soit à travers leur production dans des collisions à la frontière en intensité ou en énergie (cf. II.B et II.C), auprès du LHC par exemple, soit à travers la détection de l'interaction de ces particules nouvelles qui pourraient constituer le halo sombre de notre galaxie. L'existence des WIMPs peut en effet se révéler par le dépôt d'énergie laissé par ces particules lors de collisions élastiques avec des détecteurs à très haute sensibilité. On parle alors de détection directe, abordée dans ce paragraphe, à distinguer de la détection indirecte, où des particules ou des photons de haute énergie provenant de l'annihilation par paires de WIMPs sont recherchés dans les rayons cosmiques (cf. III.C et III.D).

La communauté française a longtemps poursuivi le développement de détecteurs cryogéniques pour la détection de WIMPs, avec l'expérience EDELWEISS où des cristaux bolométriques massifs sont utilisés pour mesurer l'augmentation de la température due au dépôt d'énergie lors de la collision d'un WIMP avec un atome du cristal. Une nouvelle technologie, celle d'une chambre à dérive remplie de liquide noble (Xe, Ar), capable de mesurer le signal d'ionisation et de scintillation, a été développée durant la dernière décennie et permet d'atteindre une bien plus grande sensibilité en termes de section efficace d'interaction de WIMPs. Ce gain est obtenu principalement grâce à une masse de cible beaucoup

plus élevée, comparée aux détecteurs cryogéniques. La communauté française est désormais impliquée dans le développement de cette nouvelle technologie, à travers le projet Xenon1T en particulier.

La recherche de particules de matière noire lourdes, avec une masse autour d'une centaine de GeV, candidat naturel dans la majorité des modèles explorés, s'est pour le moment révélée infructueuse. Plus récemment, l'imagination fertile des théoriciens et des phénoménologues a donné naissance à de nombreux modèles mettant en jeu des particules de matière noire bien plus légères, ou parfois plus lourdes, et des mécanismes de production non thermiques. Le spectre de masse des candidats à la matière noire s'étend désormais sur un grand nombre d'ordres de grandeur, depuis une fraction d'eV pour les axions jusqu'à des dizaines de masses solaires si on y inclut des objets compacts et des trous noirs. Des efforts sont donc déployés pour abaisser les seuils de détection en énergie des détecteurs bolométriques ou à liquide noble jusqu'au GeV, et d'autres technologies de détecteurs sont explorées, comme dans le cas du projet DAMIC, pour rechercher des particules de matière noires avec des masses autour de l'électron-volt (eV).

Notons également que l'observation des ondes gravitationnelles par les détecteurs LIGO et Virgo durant les dernières années a ravivé l'intérêt pour des objets compacts qui pourraient constituer une partie de la matière noire. En effet, bon nombre d'événements détectés seraient dus à des coalescences de trous noirs massifs, de plusieurs dizaines de masses solaires. L'effet de micro-lentille gravitationnelle, utilisé par le passé pour rechercher des objets compacts dans le halo galactique, permettrait de rechercher efficacement ces trous noirs massifs.

B. Cosmologie

Dans le domaine de la cosmologie, l'effort de la communauté française et celui de l'IN2P3

en particulier s'organise selon deux grands axes, qui peuvent être qualifiés comme la physique de l'inflation d'une part, et celle de l'énergie noire d'autre part.

Les fluctuations quantiques du champ scalaire responsable de **l'inflation primordiale** ont laissé leurs empreintes dans la distribution de matière et d'énergie dans l'Univers. On distingue les perturbations scalaires et tensorielles, en fonction de leur structure spatio-temporelle, les modèles inflationnaires prédisant l'existence de perturbations tensorielles. Leur présence pourrait être révélée par l'observation de structures particulières dans les anisotropies de polarisation du fond diffus cosmologique (CMB), appelées les modes B de polarisation. Pour avoir une chance d'observer ces modes, qui sont une signature de la phase d'inflation, il faut des mesures de polarisation deux à trois ordres de grandeur plus sensibles que celles de Planck.

Une importante communauté de cosmologistes spécialistes du CMB s'est constituée en France grâce à la mission Planck. Elle est aujourd'hui face au défi de se projeter dans l'avenir en l'absence de projet majeur dans le domaine en France. Une partie de la communauté française envisage de proposer une contribution majeure à la mission spatiale LiteBIRD, avec les partenaires européens et le concours des agences spatiales, le CNES et l'ESA. La mission LiteBIRD, sélectionnée par la JAXA, l'agence spatiale japonaise, pour un lancement en 2027, est dédiée à la mesure de la polarisation du CMB. Le plan focal de l'instrument serait équipé de 5 000 senseurs bolométriques de type TES (*transition edge sensor*), et couvrirait une quinzaine de bandes de fréquence, entre 30 et 500 GHz. Des réflexions sont également en cours pour une participation aux instruments d'observation depuis le sol (Simmons Observatory, Stage IV...), conçus et construits principalement par des laboratoires américains.

Les efforts pour mieux caractériser **l'énergie noire** se traduisent actuellement par la conception et la construction d'instruments pour des relevés dans le domaine optique, photométriques ou spectroscopiques. Ceux-ci

ont pour objectif la cartographie de la distribution de matière, l'observation et la mesure de chandelles standard (SNIa...) et de règles standard (BAOs...) à des distances de plus en plus grandes, afin d'étendre la reconstitution de l'histoire de l'expansion cosmique jusqu'aux grands décalages vers le rouge ($z < 3$).

La communauté française est fortement impliquée dans les relevés photométriques LSST et la mission spatiale Euclid ; elle contribue également au relevé spectroscopique DESI. L'observation de l'Univers lointain avec ces nouveaux instruments annonce une décennie passionnante pour la cosmologie et l'étude de l'énergie noire et de la matière noire. En effet, le lancement de la mission Euclid, dédiée principalement à l'étude des grandes structures à travers l'effet de cisaillement gravitationnel, est prévu en 2022. Le relevé photométrique LSST devra également démarrer en 2022, pour une durée de dix ans, permettant l'exploration de l'Univers de plus en plus lointain, avec les supernovae, le cisaillement gravitationnel, les grandes structures et pléthore d'autres sondes cosmologiques.

D'autres fenêtres d'observation commencent également à s'ouvrir, dans le domaine radio en particulier, de 100 MHz jusqu'au GHz, à travers lesquelles on peut obtenir des cartes tridimensionnelles de l'Univers grâce à la raie à 21 cm de l'hydrogène atomique. La première phase du radiotélescope géant SKA (Square Kilometer Array) devrait être opérationnelle au milieu de la prochaine décennie, et la cartographie d'intensité, à 21 cm et avec d'autres raies, devrait apporter des informations précieuses et complémentaires aux relevés optiques.

C. Astronomie gamma

Les rayonnements électromagnétiques de haute énergie offrent une possibilité d'étudier des phénomènes parmi les plus violents de l'Univers et des environnements extrêmes. L'IN2P3 est impliqué de longue date dans des

détecteurs couvrant une large gamme en énergie allant du MeV à la centaine de TeV et œuvre à faire advenir la prochaine génération d'instruments. Aujourd'hui, 28 chercheurs de la O1 travaillent sur l'astronomie gamma.

La partie basse de la gamme d'énergie est couverte par les activités de physiciens français au sein des missions spatiales INTEGRAL et son successeur Fermi, qui est actuellement le télescope gamma le plus sensible. Son instrument Fermi-LAT a détecté plus de 5 000 sources, dont plus de mille nouvelles : les catalogues LAT, qui se sont succédé au fil des années, comprennent des vestiges de supernova, des nébuleuses de vent de pulsar, des pulsars, des systèmes binaires, plusieurs classes de galaxies et un grand nombre de sources non identifiées. Tout aussi remarquable a été l'étude de l'émission diffuse gamma dans notre galaxie et notamment la caractérisation des « bulles de Fermi », des structures au-dessus et au-dessous du centre galactique s'étendant sur 50 000 années-lumière environ.

À plus haute énergie, HESS a atteint ces dernières années sa pleine maturité avec la publication de quinze années d'observations réalisées avec l'instrument dans sa configuration initiale (HESS I), la menée à bien d'une opération de jouvence des caméras des quatre premiers télescopes, et l'exploitation scientifique de la seconde phase de l'expérience après l'ajout du plus grand télescope d'imagerie Cerenkov atmosphérique jamais construit (HESS II).

L'héritage de HESS I publié en 2018 inclut un relevé en rayons gamma du plan galactique, des études de population portant sur les nébuleuses de vent de pulsar et les vestiges de supernova, des études détaillées de sources individuelles, parmi lesquelles des sources extragalactiques, dont des galaxies actives, ainsi que la recherche de nouvelles classes de sources de rayonnement gamma de très haute énergie. La publication des premiers résultats obtenus avec HESS II est venue couronner un travail d'analyse ardu. Ces efforts préfigurent les défis qui se profilent pour CTA en vue de l'exploitation d'un réseau hybride de télescopes.

Avec huit laboratoires impliqués, l'IN2P3 s'est fortement investi dans la préparation du projet CTA (Cerenkov Telescope Array) et dans la phase de construction initiale qui a permis au premier télescope de grande taille de voir le jour sur le site nord du réseau. Cette réalisation est une étape importante vers la mise en œuvre à terme d'une centaine de télescopes de taille variable sur deux sites (nord et sud), configuration qui apportera un gain en sensibilité d'un ordre de grandeur par rapport aux instruments actuels, dans la gamme d'énergie allant de 10 GeV à 100 TeV.

Les performances de CTA permettront de mener un riche programme de physique visant à comprendre l'origine et le rôle des rayons cosmiques relativistes, à sonder les environnements extrêmes (par exemple au voisinage des trous noirs et des étoiles à neutrons) et à explorer les frontières de la physique (notamment la nature de la matière noire). CTA exploitera les synergies avec les ondes gravitationnelles, les observatoires de neutrinos et de rayons cosmiques, ainsi que les satellites gamma à plus basse énergie. Parmi ces derniers, l'IN2P3 contribue fortement au projet sino-français SVOM dédié à l'étude approfondie des sursauts gamma, avec un lancement prévu en 2021.

D. Rayons cosmiques chargés

La loi de puissance apparemment régulière qui décrit le spectre d'énergie des rayons cosmiques (RC) cache en fait de faibles variations, nous donnant des indices sur la propagation et l'origine des RCs. L'étude détaillée de structures aussi subtiles a nécessité des données de plus en plus nombreuses et de plus en plus précises. L'expérience AMS-02 à bord de la Station spatiale internationale (ISS) et l'observatoire Pierre Auger en Argentine, conçus dans les années 1990 pour étudier les rayons cosmiques de haute énergie, ont répondu à cette nécessité avec une riche récolte de données et de résultats offrant un cadre sans précédent pour sonder leur origine et leur transport dans

le milieu interstellaire. Les scientifiques français ont joué un rôle clef dans les deux projets, de la conception des instruments à la production des résultats de physique.

Sur l'ISS, AMS-02 est un spectromètre magnétique conçu pour mesurer les flux des différents noyaux aux énergies entre le GeV et le TeV. Lancé en 2011 et opérationnel jusqu'en 2024, il a déjà détecté plus de 140 milliards de rayons cosmiques galactiques. Grâce à la statistique élevée et à la haute précision des mesures, des avancées majeures ont été possibles, notamment avec la découverte de ruptures dans le spectre en énergie de tous les noyaux, suggérant un changement de régime dans la propagation des rayons cosmiques. Le spectre des électrons et des positrons a également été étudié de manière très précise, ainsi que la fraction de positrons. Cette dernière, croissante avec l'énergie, ainsi que le rapport quasi constant entre protons et antiprotons, ont potentiellement des implications considérables pour les théories de l'origine des RCs, y compris des interprétations en termes de nouvelles sources astrophysiques ou de matière noire.

En Argentine, l'observatoire Pierre Auger, avec ses 3 000 km², est le plus grand détecteur au monde de gerbes atmosphériques, conçu pour étudier les rayons cosmiques aux plus hautes énergies, au-dessus de 1 EeV. Opérationnel depuis 2004, ses mesures ont bouleversé la vision traditionnelle des rayons cosmiques à ultra haute énergie (RCUHE). La découverte d'une anisotropie dipolaire pointant en dehors de notre galaxie démontre que leur origine est extragalactique. D'autre part, la découverte de nouvelles structures dans le spectre d'énergie, l'indication d'une tendance de la masse primaire vers des noyaux lourds et l'indication d'une corrélation avec des sources astrophysiques proches à des échelles angulaires assez grandes remettent en cause l'hypothèse que les RCUHEs soient principalement des protons. Une amélioration de l'observatoire, soutenue par l'IN2P3, est en construction, et sera exploitée au moins jusqu'en 2025, pour améliorer la sensibilité à la composition en masse autour de la fin du spectre énergétique.

Les contributions des scientifiques français aux deux instruments ont été bien soutenues par l'IN2P3, en termes de financements et de ressources humaines, bien que ces dernières se soient concentrées surtout dans les premières phases des deux expériences. Le nombre de physiciens de la O1 aujourd'hui impliqués sur ces sujets est de l'ordre d'une dizaine. Il reste à définir comment progresser à long terme, car la simple augmentation de leurs dimensions ne permettrait pas un accroissement assez significatif du nombre d'événements ni une amélioration significative des résolutions. Une partie de la communauté française s'intéresse à de nouvelles voies, notamment les réseaux gigantesques d'antennes radio au sol (projet GRAND) et la détection des RCUHES depuis l'espace (projet POEMMA). Le premier consistera en un réseau d'antennes radio couvrant une surface de 200 000 km² en Chine : la France participe au prototype GRANDProto300. POEMMA, avec ses deux photomètres sur deux satellites pour l'observation en fluorescence et en radiation Cerenkov, représente d'autre part l'évolution des travaux précédents sur le projet JEM-EUSO, auquel des scientifiques français ont participé dans la conception et l'opération de différents prototypes.

E. Ondes gravitationnelles

Last but not least, l'éclosion spectaculaire de l'astronomie des ondes gravitationnelles (OG) est sans doute le fait le plus marquant de la période couverte par le présent rapport. Le succès est venu avec l'avènement des instruments de deuxième génération, qui ont apporté un gain en sensibilité décisif par rapport aux détecteurs LIGO et Virgo initiaux. Les laboratoires de l'IN2P3 sont de longue date impliqués dans la construction et la mise en œuvre de Virgo et ont contribué de façon importante à toutes ses évolutions, dont la phase actuelle Advanced Virgo. Bien que de sensibilité moindre que celle des deux détecteurs LIGO, Virgo est un élément crucial du réseau d'antennes OG, un troisième instrument

permettant alors d'effectuer un pointage des sources dans le ciel. Les équipes de l'IN2P3 ont également une grande visibilité dans l'exploitation scientifique des données, menée conjointement au sein de la collaboration LIGO-Virgo qui représente un modèle original de coopération scientifique entre projets.

Des premiers signaux détectés par LIGO aux premières sources observées à la fois avec LIGO et Virgo, dont le premier événement multi-messagers impliquant des OG, c'est un nouveau champ disciplinaire qui s'est ouvert. Citons notamment les découvertes emblématiques qui ont marqué cette période : première observation d'une coalescence de trous noirs (GW150914) et première observation d'une coalescence d'étoiles à neutrons (GW170817), cette dernière étant également observée dans l'ensemble du spectre électromagnétique. Au total, la détection d'une douzaine de sources de 2015 à 2017 a permis la publication d'un premier catalogue de sources transitoires d'OG, et le nombre de candidats a déjà plus que doublé avec les observations de 2019.

Ces détections représentent le prélude de l'exploitation des OG pour faire progresser l'astrophysique, la physique fondamentale et la cosmologie, qui se décline sur plusieurs fronts : caractérisation de la population de sources, tests de la relativité générale pour rechercher des signes de nouvelle physique, spectroscopie des trous noirs, exploration de la structure des étoiles à neutrons pour élucider l'équation d'état de la matière ultra-dense, mesure indépendante de la constante de Hubble, approfondissement du lien entre coalescences de binaires et sursauts gamma, kilonovae, production des éléments les plus lourds de l'Univers...

Ces dernières années ont par ailleurs vu des avancées importantes dans la préparation de futurs projets. D'une part, dans la perspective du projet LISA d'interféromètre spatial explorant la bande de fréquence autour du mHz, le démonstrateur de vol LISA Pathfinder, dans lequel une équipe de l'IN2P3 a joué un rôle important, a démontré la possibilité de placer deux masses test en chute libre avec une accélération relative inférieure au femto-g, ce qui a

permis la sélection de LISA par l'ESA en tant que mission L3. D'autre part, le succès des interféromètres terrestres a ravivé l'activité en vue d'une troisième génération d'instruments. Les chercheurs de l'IN2P3 ont été nombreux à s'associer à la lettre d'intention parue en 2018 en faveur du projet européen Einstein Telescope (ET). Aujourd'hui, une vingtaine de chercheurs de la 01 travaillent sur les ondes gravitationnelles.

Les enjeux associés à l'évolution de cette thématique sont à la mesure de son potentiel scientifique : croissance du réseau de détecteurs (amorcée avec la mise en service du détecteur KAGRA), essor des collaborations (amorcée avec le renfort de nouveaux groupes), financement des améliorations instrumentales dans les infrastructures existantes, financement et préparation en Europe de deux projets majeurs au calendrier comparable (LISA et ET), exploitation optimale du potentiel multimessager. Sur ce dernier point, soulignons la nécessité d'une bonne coordination entre l'IN2P3 et l'INSU pour assurer la complémentarité des moyens d'observation et un fort impact des chercheurs français, dans un contexte délicat où s'accroît la pression pour réduire les données propriétaires et leur durée.

IV. R&D

Les recherches décrites dans ce rapport nécessitent des instruments à la technologie pointue, spécifiquement conçus pour répondre aux exigences des différents programmes scientifiques, qu'il s'agisse des accélérateurs ou des détecteurs mis en jeu. L'IN2P3 est partie prenante et souvent *leader* dans leur développement, qui s'accomplit le plus souvent au sein de collaborations internationales. L'institut intervient dans toutes les phases des projets : R&D en amont, conception, construction, installation, mise au point, opération, maintenance, jouvence. Ces développements doivent répondre à des défis variés portant notamment sur la sensibi-

lité, la dynamique, la granularité, la résolution, la vitesse, la tolérance aux radiations des instruments. Pour y faire face, l'institut s'appuie à la fois sur ses chercheurs et sur ses IT, dont le nombre est en rapport avec l'ampleur des développements instrumentaux (le rapport IT/chercheurs est de 1,5 à l'IN2P3, enseignants-chercheurs compris), faisant valoir des compétences dans de multiples domaines : électronique (analogique, numérique, micro-électronique), mécanique, informatique, optique, automatique, instrumentation...

Les sections suivantes détaillent davantage deux domaines qui font l'objet d'un pilotage spécifique de l'institut, avec des DAS dédiés : les activités pour le développement d'accélérateurs et celles autour des enjeux numériques.

A. Accélérateurs

Les accélérateurs de particules sont des équipements de haute technologie nécessitant des développements pluridisciplinaires. Leur conception, leur construction, ainsi que leur exploitation nécessitent l'investissement de ressources humaines de toutes catégories et de métiers extrêmement divers, incluant de l'ingénierie de pointe mais aussi le résultat de recherches fondamentales, parfois identifiées sous le terme générique de « physique des accélérateurs ». Ces machines sont mises au service de la recherche, qu'elle soit fondamentale ou appliquée, ont des applications concrètes dans de nombreux domaines, mais représentent aussi un domaine de recherche à part entière.

En France, les acteurs du secteur sont très principalement au CNRS-IN2P3, au CEA-IRFU, ainsi que dans les deux sociétés civiles en charge des synchrotrons ESRF et SOLEIL. Les personnels des laboratoires rattachés à l'IN2P3 (~310 ETP, dont une dizaine de chercheurs de la 01) exercent leurs activités principales au sein de projets regroupés par thématiques ou au sein de plateformes, suivis par un DAS « Accélérateurs et Technologies ». Cette structuration, initiée par la nouvelle direction de

l'IN2P3 à partir de 2016, améliore la visibilité des actions de l'institut dans le domaine et favorise l'interaction entre les différentes équipes de recherche ; elle devrait aussi permettre de mieux cibler les actions de R&D vers les exigences de la physique. La création récente d'un réseau « instrumentation faisceau » va dans le même sens. L'IN2P3 a aussi mis en place la labellisation de ses plateformes afin d'harmoniser leur gouvernance, leur mode de fonctionnement, ainsi que leur visibilité.

Dans ce paysage, notons la spécificité du GANIL qui regroupe environ deux cents personnels techniques, pour moitié CNRS et pour moitié CEA, ainsi que plus de trente personnes sous contrat à durée déterminée. Cette plateforme de recherche à vocation internationale est à l'aube d'une nouvelle ère, suite à la construction de l'accélérateur linéaire supraconducteur d'ions stables haute intensité de SPIRAL2 et à l'autorisation toute récente (juillet 2019) de l'Autorité de sûreté nucléaire pour la mise en service de l'installation. Cette dernière est donc maintenant entrée dans sa phase de qualification initiale, avec les objectifs de qualifier l'installation « Neutrons For Science » en 2020 et d'y mener la première expérience de physique en 2021. Concernant la production d'ions exotiques, qui est un domaine en plein essor au niveau international, la France y participe activement avec ses installations au GANIL, ainsi qu'avec l'Accélérateur linéaire et tandem à Orsay (ALTO). L'upgrade de SPIRAL a été mis en service courant 2018, grâce à un booster de charge ECR. Il a produit ses premiers faisceaux d'ions exotiques condensables dont la disponibilité va permettre d'étendre considérablement les domaines de recherche abordés. Quant à SPIRAL2, dont il convient de terminer la phase 1 et de préparer le futur avec un injecteur de haute intensité, il est devenu en 2016 un « *landmark* » de l'European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI). Par ailleurs, l'IN2P3 contribue de manière significative à la construction de grands projets internationaux, tels que l'ESS en Suède, FAIR en Allemagne, MYRRHA 100 MeV en Belgique. Pour la description des domaines stratégiques d'excellence de l'institut on se reportera au très

complet rapport de perspectives du conseil scientifique de l'IN2P3 de décembre 2018.

Dans un avenir proche, la structuration des équipes du domaine va être profondément modifiée du fait de la fusion des laboratoires de la vallée d'Orsay. En effet à l'issue du processus, 80 % des effectifs IT du domaine des accélérateurs seront concentrés dans deux laboratoires (50 % dans le laboratoire d'Orsay, 30 % au GANIL), les 20 % restants étant partagés entre sept laboratoires. Il conviendra de suivre avec attention cette évolution et d'en mesurer les possibles impacts sur la politique stratégique de l'institut dans le domaine des accélérateurs.

B. Numérique

La nécessité de traiter les importants volumes de données générées par les détecteurs complexes développés et utilisés par les chercheurs de l'institut les a amenés à développer une expertise dans le domaine de l'analyse et de la gestion de grandes masses de données. La communauté a également développé des méthodes avancées de caractérisation et de discrimination statistique, applicables à ces données. De plus en plus d'algorithmes fondés sur l'apprentissage automatique (*machine learning*) et plus généralement sur l'intelligence artificielle (IA) sont développés et inclus dans les chaînes d'analyse, après une évaluation rigoureuse et quantitative de leur performance.

L'utilisation des outils issus de l'IA se répand rapidement dans de nombreux domaines d'activité, sensibles pour certains comme le diagnostic médical. Le savoir-faire des chercheurs de la section dans l'évaluation rigoureuse des performances des méthodes d'analyse et de classification automatique est un atout dans ce contexte. En effet, l'association de chercheurs spécialisés dans le domaine de l'IA et de chercheurs de l'IN2P3 permettrait une qualification rigoureuse des nouveaux algorithmes.

Le centre de calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3), installé sur le campus de Villeurbanne à Lyon en 1986, est une unité de service et de recherche du

CNRS offrant des ressources de stockage et des services de calcul haut débit (*high throughput*), complémentaires aux services offerts par les autres centres de calcul du CNRS, l'IDRIS en particulier, plutôt orienté vers le calcul haute performance (parallélisme massif). Il constitue également un centre de compétences et ses services sont désormais ouverts à des projets de recherche au-delà de l'IN2P3.

nis, du monde subatomique au cosmos. Ils sont le fruit d'une collaboration constante de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens du monde entier, alimentés par des moyens importants et récurrents. La plus emblématique découverte de ces cinq dernières années est sans doute celle des ondes gravitationnelles, prédites près d'un siècle auparavant. Elles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers, et des perspectives fascinantes d'astrophysique multi-messagère.

Conclusion

De nombreux résultats ont été obtenus ces dernières années dans le champ des deux infi-

nis, du monde subatomique au cosmos. Ils sont le fruit d'une collaboration constante de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens du monde entier, alimentés par des moyens importants et récurrents. La plus emblématique découverte de ces cinq dernières années est sans doute celle des ondes gravitationnelles, prédites près d'un siècle auparavant. Elles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers, et des perspectives fascinantes d'astrophysique multi-messagère.

Ce genre d'avancées repose sur la confiance et l'évaluation a posteriori, et elles nécessitent un flux d'embauches soutenu, ainsi qu'un investissement pérenne dans de très grands équipements de recherche.

ANNEXE 1

Science ouverte

L'époque s'anime d'un débat sur la science ouverte. La section 01 ne peut qu'adhérer à cette philosophie. La très grande majorité de ses chercheurs publient leurs résultats depuis des décennies sur des archives ouvertes (spires, inspire-hep, arxiv...) en même temps qu'ils les envoient aux journaux traditionnels pour validation par leurs pairs. Il convient néanmoins que la science ouverte ne s'accompagne pas d'une prolifération des bases de données que les chercheurs devraient alimenter.

(analyse de la section). Si la proportion globale n'évolue pas, l'équi-répartition dans les grades s'améliore.

Tableau 1: Pour chaque grade, nombre de chercheuses et de chercheurs en section 01 (F : H) suivi du pourcentage de chercheuses, en 2016 (bilan social du CNRS) et 2019 (analyse de la section).

Grade	2016		2019	
	F : H	%	F : H	%
DRCE	0 : 10	0	3 : 13	18%
DR1	9 : 53	14%	11 : 74	13%
DR2	26 : 103	20%	34 : 95	26%
Total DR	35 : 158	17%	48 : 182	21%
CR1 / HC	56 : 134	29%	3 : 12	20%
CR2 / CN	11 : 34	24%	53 : 151	26%
Total CR	67 : 168	28%	56 : 163	26%
Total	102 : 334	23%	104 : 345	23%

Parité

Les statistiques de la section 01 en termes de parité sont portées dans le tableau suivant pour les années 2016 (bilan social du CNRS) et 2019

SECTION 02

THÉORIES PHYSIQUES : MÉTHODES, MODÈLES ET APPLICATIONS

Composition de la section

Peter HOLDSWORTH (président de section), Diego GUADAGNOLI (secrétaire scientifique), Aurélien BARRAU, Francesca CHILLÀ, Benjamin FUKS, Vivien LECOMTE, Karim NOUI, Patrick PETER, Aleksandra PETKOVIC, Michela PETRINI, Artyom PETROSYAN, Éric RAGOUCY AUBEZON, Sébastien RENAUX-PETEL, Vincent RIVASSEAU, Didina SERBAN, Véronique TERRAS, Sophie TOUSSAINT-LEROY, Aleksandra WALCZAK, Samuel WALLON.

1. Présentation de la section

A. Introduction

La section 02 est concernée par tous les domaines scientifiques visant à la modélisation microscopique ou fondamentale des lois de la physique, de l'échelle cosmologique à celle des particules élémentaires en passant par les échelles de la biophysique et de la physique de l'environnement.

Si les activités de recherche de la section 02 sont ancrées dans des disciplines telles que la physique des hautes énergies, la physique mathématique, la matière condensée, la physique statistique et la physique non-linéaire,

elles s'étendent bien au-delà. Par vocation même, la section 02 a des interfaces fructueuses et dynamiques non seulement avec toutes les autres sections de l'INP (03, 04, 05), mais aussi avec celles de l'IN2P3 (01), de l'INSU (17), de l'INSMI (41), de l'INS2I (06), de l'INSIS (10), de l'INC (11) avec les sections interdisciplinaires comme la CID 51 et d'autres encore. Le schéma de la figure 1, qui propose une représentation graphique du nombre de candidats se présentant aux concours du CNRS par section et se présentant à plusieurs sections, illustre le rôle central que joue la section 02 dans l'INP par son poids et par ses interactions avec les autres sections. Ces deux éléments témoignent du dynamisme de la section 02 ainsi que de l'attractivité remarquable qu'elle exerce sur les jeunes chercheurs.

Bien que notre section soit largement dédiée à la physique théorique, les expériences

tateurs dans des domaines tels que la physique non-linéaire et la mécanique statistique, qui utilisent des méthodes proches de la modélisation, en font aussi pleinement partie.

Cette notion de *théorie et modélisation* est une composante essentielle et vitale de notre section. Elle se situe souvent *en amont* de l'expérience et tourne autour de questions fondamentales de la physique à toutes les échelles, permettant la compréhension profonde de la nature par les lois de la physique. Un des exemples les plus célèbres est sans doute la relativité générale, développée par Einstein bien avant sa confirmation expérimentale, sans parler de la conception d'applications telles que le GPS. Des exemples similaires valent pour les lasers, les inégalités de Bell, le boson de Higgs, ou encore les trous noirs.

rôles peuvent être renversés au cours du temps : la récente détection historique des ondes gravitationnelles émises par l'effondrement d'un système binaire d'objets compacts en est une belle illustration. Rien n'aurait en effet été possible sans l'élaboration de la théorie de la relativité générale, ni sans le calcul précis des formes d'ondes émises par le binaire qui a permis d'interpréter les résultats obtenus. Les récents résultats fondamentaux sur la dynamique des systèmes quantiques ouverts, les avancées dans les applications et la compréhension des techniques d'apprentissage profond offrent autant d'autres exemples d'actualité de l'importance cruciale que joue la théorie dans la physique expérimentale.

La section 02 est également proche des mathématiques : elle utilise les outils formels les plus abstraits et elle en crée de nouveaux. Des exemples historiques sont la 'fonction' delta de Dirac, utilisée bien avant sa définition rigoureuse, ou l'intégrale de chemin, que le physicien théoricien utilise pour des calculs de quantités testées dans de nombreuses expériences, alors que sa définition mathématique précise pose encore des défis. On peut faire une longue liste d'exemples contemporains, dans les systèmes intégrables, dans la théorie des champs conformes, dans la théorie des cordes, dans la physique statistique, dans la physique non linéaire et turbulence ou encore dans la géométrie non-commutative, qui ont fourni des concepts inédits pour la compréhension mathématique des groupes quantiques, des invariants topologiques, des théories des grandes déviations, ou encore de l'effet Hall quantique. Ainsi, il existe des liens *naturels* et très forts entre les mathématiciens de l'INSMI et les physiciens théoriciens de l'INP. Ces liens sont parfois formalisés par des échanges de postes entre les sections 41 et 02.

Ces échanges nous semblent fructueux et importants, car ils contribuent à diffuser les idées des mathématicien.ne.s ou bien des expériences aux physicien.ne.s théoricien.ne.s et vice-versa. Cependant, et comme illustré plus haut, les mathématiques ou la physique

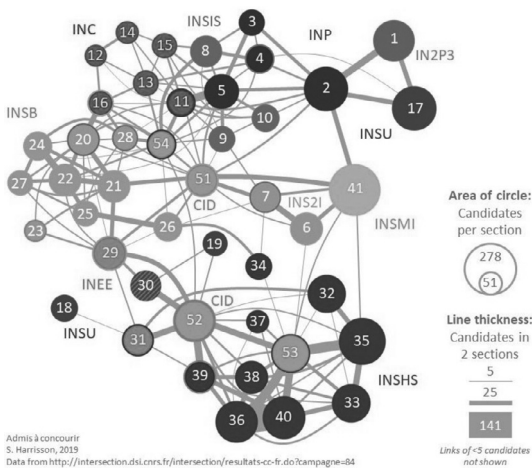


Figure 1 : Candidatures au CNRS section par section. Le nombre des candidats est proportionnel à l'aire du cercle et le nombre de communs à deux sections à l'épaisseur de la ligne connectant. L'INP est composé des sections 02, 03, 04 et 05.

En revanche, nombre de grandes avancées scientifiques ont eu lieu grâce à des découvertes expérimentales suivies d'avancées conceptuelles, comme ce fut le cas par exemple pour la supraconductivité à haute, après celle à basse température. Dans ces cas, la section 02 se place *en aval* des découvertes, en analysant, interprétant et modélisant les résultats. Les

expérimentale des grands instruments d'un côté et la physique théorique de l'autre constituent *des domaines fondamentalement différents dans leurs approches et dans leurs questionnements*, même si *leur interaction reste fondamentale* pour le développement de la recherche et d'idées nouvelles.

Sur la base des considérations ci-dessus, nous aimerions dans cette introduction mettre en avant quelques messages que nous considérons cruciaux pour le futur de la recherche dans notre domaine.

Le premier message porte sur la nécessité que la recherche en physique fondamentale théorique reste libre. La seule chose que nous pouvons prédire avec certitude est l'avènement de futures ruptures conceptuelles que nous ne saurions ni anticiper ni même imaginer dans ce rapport. Un élément vital pour catalyser de telles avancées conceptuelles est une approche à la recherche *libre de tout pilotage*, permettant le développement de la connaissance en tant que telle, sans la pression des retombées économiques directes. Cette liberté indispensable est dans l'ADN du CNRS depuis sa création.

Ce fait est aujourd'hui mis à rude épreuve par la culture des financements sur projet. Nous voudrions donc mettre en garde ceux qui pourraient penser qu'un pilotage de la recherche fondamentale soit souhaitable.

Pour introduire le deuxième message, nous aimerions d'abord constater l'énorme nombre de candidat.e.s excellent.e.s postulant chaque année dans notre section. Cela est une conséquence à la fois de l'attractivité de la recherche poursuivie dans notre section et de la grande étendue de nos thématiques. Ce flux de candidat.e.s se traduit par une forte pression sur les postes de chargé de recherche, et aussi sur les promotions. Par exemple, en 2019 nous avons eu 250 candidats pour cinq postes CRCN, dont un pour un laboratoire en section 41 (INSMI). Cela conduit à un taux de sélection de 2% : ce chiffre impressionnant entraîne un concours extrêmement compétitif, et une très grande qualité des embauché.e.s.

Cette qualité est en soi un élément positif, mais aujourd'hui mis lui aussi à rude épreuve par les menaces qui pèsent sur l'emploi scientifique au sein des organismes publics de recherche et d'enseignement supérieur. À cause de la pénurie de postes, notre section *n'arrive désormais à absorber qu'une petite fraction de tout.e.s les candidat.e.s excellent.e.s*. Cette situation est très dangereuse, car elle finit par *décourager celles et ceux qui aimeraient oser la carrière de la recherche*. Notre message est que le maintien d'un flux entrant *raisonnable* dans la section est essentiel au maintien de l'excellence française dans nos disciplines.

Nous reconnaissons l'effort considérable fait ces dernières années par le CNRS en général, et l'INP en particulier, pour conserver un nombre minimal de postes, mais la section est extrêmement inquiète pour son avenir. En conséquence la section soutient avec la plus grande vigueur les actions de la CPCN pour maintenir, voire augmenter, le nombre de postes de chargé de recherche et de promotions ouverts dans un avenir proche.

1.2 Thématiques de la section

La section est, pour les raisons pratiques, organisée en quatre thématiques, décrites dans la Sec. 1.2. Cependant, il existe un très fort recouvrement entre ces thématiques, qui se manifeste par des outils théoriques communs et par la créativité individuelle des chercheurs, qui ont donné lieu à des avancées majeures. On peut citer comme exemples, l'interface entre l'astrophysique/cosmologie et les systèmes dynamiques et non-linéaires, les démarches de théorie de champs appliquées à la fois en physique des particules et en matière condensée, ou encore l'étude des systèmes hors-équilibre, qui réunit la physique mathématique, la matière condensée et la physique statistique.

Chapitre 1 : Physique des interactions fondamentales, cosmologie, astrophysique

Ce chapitre concerne la compréhension des forces “fondamentales”, soit les interactions à l’origine ultime de tout phénomène. Exception faite de l’interaction électromagnétique, ces forces agissent soit à très courte, soit à très longue distance. En conséquence, on utilise des méthodes basées soit sur des collisions contrôlées à très grande énergie, permettant de tester les distances les plus courtes possibles, soit sur des observations astrophysiques ou cosmologiques, explorant les distances les plus grandes. Les années récentes ont été marquées par deux découvertes majeures dans ces deux extrêmes : la découverte du boson de Higgs, et la première preuve directe de l’existence des ondes gravitationnelles. Ces découvertes ajoutent des éléments cruciaux dans la compréhension des interactions sous-jacentes, et ouvrent de nouveaux domaines de recherche, comme détaillé dans la suite. Il faut remarquer que, malgré ces résultats, la grande majorité du bilan en énergie et en matière de l’Univers reste encore obscure. Pour répondre à ces questions, les méthodes utilisées évoluent constamment.

Interactions fortes

Les interactions fortes sont comprises dans le cadre de la chromo-dynamique quantique (QCD). Elles ont des applications très transversales, allant des calculs de précision de processus produits dans des collisionneurs hadroniques, l’étude de la structure interne des hadrons, la compréhension des processus nucléaires et de la dynamique stellaire, jusqu’à des aspects plus formels tels les dualités, pour lesquels la QCD offre un “banc d’essai” concret.

Le premier des aspects mentionnés, la QCD aux collisionneurs, a connu des progrès vertigineux dans les dernières années, coïncidant avec les Runs 1 et 2 du Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) : (1) la totalité des processus

est désormais connue au 2^e ordre perturbatif (“NLO”) en QCD, et le calcul est entièrement automatisé (“NLO revolution”). Ces calculs sont combinés avec les algorithmes de cascades partoniques et d’hadronisation (qui lient les quarks de la QCD aux états observés, les hadrons) pour obtenir des prédictions dont la précision typique est désormais meilleure que, ou égale à, 10% ; (2) les jets de hadrons, particulièrement dans le régime de grande énergie (jets “boostés”) sont devenus un domaine de recherche en soi, dont les applications vont jusqu’à l’intelligence artificielle, avec qui elles ont de nombreux sujets de recherche en commun (jet imaging, *etc.*) ; (3) l’étude des distributions de partons dans les hadrons – une des sources principales d’incertitude – a également atteint le statut de physique de précision, grâce à davantage de données, à de nouveaux calculs et à des techniques numériques nouvelles ; (4) dans son régime non-perturbatif (couplage fort) la QCD peut être discrétisée dans un réseau espace-temps (“Lattice QCD” LQCD) et certaines classes de processus ainsi simulées à partir de principes premiers. LQCD a récemment connu une véritable transition de phase en termes de processus que l’on peut simuler et de la précision que l’on peut atteindre, grâce à une progression dans la compréhension des théories de jauge discrétisées, ainsi que dans les techniques de calcul et dans les ressources de calcul.

L’étude de la structure interne multidimensionnelle des nucléons en termes de quarks et gluons, incluant la localisation spatiale, en impulsion et spin, a fait des progrès considérables ces dernières années, et la construction de différents outils théoriques perturbatifs et non perturbatifs permet maintenant d’espérer obtenir une image quantitative précise de cette structure à l’horizon d’une à deux décennies, dans une très large gamme d’énergie. La communauté française y occupe un rôle majeur, en lien étroit avec les expériences actuelles (LHC, Jefferson Lab...), et joue un rôle moteur dans la définition des questions de physique au coeur des projets de collisionneurs électron-proton et électron-ion au CERN et aux USA.

Aux énergies des collisionneurs, la compréhension de multiples effets collectifs dits nucléaires froids, en particulier la saturation gluonique, est essentielle pour caractériser l'état initial dans les collisions d'ions lourds, avant formation du plasma quarks gluons (QGP). La compréhension des processus nucléaires et de la dynamique stellaire s'appuie de façon cruciale sur ces programmes expérimentaux de collisions d'ions lourds, permettant d'explorer la QCD à température finie et à haute densité, et de caractériser le QGP et plus généralement le diagramme de phase de la matière nucléaire. Ce domaine très vaste et très interdisciplinaire offre des liens avec des domaines allant de la physique des fluides aux méthodes formelles dites holographiques. Des progrès récents, reposant sur l'utilisation de théories effectives, permettent, en partant des degrés de liberté fondamentaux de QCD, d'attaquer sous un nouvel angle des questions anciennes et difficiles liées à la compréhension de la matière nucléaire : la structure des noyaux, les réactions nucléaires et leurs applications dans la compréhension de la dynamique stellaire et dans la technologie de la fusion et de la fission.

Interactions électrofaibles et physique au-delà du modèle standard

Dans les dernières années ce domaine a été marqué par une découverte majeure : la découverte d'une particule scalaire dont les propriétés montrent un accord de plus en plus solide avec celles du boson prédit par le mécanisme de Brout-Englert-Higgs. Cette information est une pierre angulaire dans la consolidation du Modèle Standard, notamment du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible. La compréhension de ce mécanisme a des conséquences profondes sur le comportement ultraviolet de la théorie. Par ailleurs, le potentiel de Higgs dans le Modèle Standard est une paramétrisation plutôt qu'une vraie théorie, n'expliquant pas le mécanisme qui engendre une densité non-nulle du champs de Higgs dans le vide, ni sa valeur, ni la raison de sa stabilité par rapport à l'échelle de masse des

interactions gravitationnelles, ni les couplages aux fermions. Au-delà de l'intérêt pour l'avancement des connaissances, ces questions sont importantes car elles pourraient avoir une liaison avec le problème concret peut-être le plus pressant du Modèle Standard : l'incapacité de décrire la Matière Noire.

D'un point de vue à la fois théorique et expérimental, ces questions ouvrent de nombreuses pistes d'exploration ultérieure : (a) l'étude de précision des couplages de Higgs, et du secteur électrofaible, particulièrement des polarisations longitudinales des bosons de jauge. Plusieurs projets de successeurs au LHC sont à l'étude à cette fin ; (b) la recherche directe de nouvelles particules dans les données de haute énergie, afin d'établir si une symétrie, ou d'autres secteurs de jauge, qu'ils soient fortement ou faiblement interagissant, entrent en jeu autour de l'échelle électrofaible ; (c) la recherche indirecte de ces nouvelles particules par des modifications dans des processus opportuns, qui dans le cadre du Modèle Standard sont soit interdits, soit très rares à cause de leur structure spécifique.

Cette dernière catégorie est très vaste. Actuellement, les directions principales sont : (1) les tests de précision de processus à haute impulsion transverse ; (2) l'étude des processus de haute intensité et basse énergie, par exemple les désintégrations de hadrons avec changement du nombre quantique dit de saveur (correspondant à la masse des quarks impliqués). Cette étude bénéficie à la fois d'une quantité immense de données, que l'on peut produire à des coûts relativement bas, et de l'existence de cadres théoriques bien compris permettant une grande précision dans les prédictions. Un élément majeur de cette précision sont les avancées dans les techniques de LQCD mentionnées dans la partie Interactions Fortes.

Au-delà de ces directions bien établies, il en existe un grand nombre d'autres qui forment ce qu'on appelle la physique fondamentale au-delà des collisionneurs, un domaine très interdisciplinaire et en pleine évolution. Parmi ces autres directions on peut mentionner, par exemple, la recherche de nouvelles particules

légères, attendues dans plusieurs cadres au-delà du Modèle Standard, dont ceux provenant des cordes, et ceux expliquant le “strong-CP problem”, c.-à-d. l’absence apparente de violation de la symétrie CP par la QCD, nonobstant les nombreuses raisons de s’attendre au contraire. De nouvelles techniques de mesure ont été proposées dans le cadre d’expériences de “beam dump”, de techniques basées sur l’interférométrie, sur la résonance magnétique nucléaire, et même sur la population de trous noirs avec des spins et masses donnés. Bien que l’échelle de masse de telles particules légères puisse couvrir plusieurs ordres de grandeur, ces expériences ont des sensibilités complémentaires, et ont des coûts modérés.

Les neutrinos fournissent une réalisation explicite de particules massives légères dans la nature, leur masse non-nulle conduisant à une extension du Modèle Standard, comportant une nouvelle échelle d’énergie (pouvant couvrir plusieurs ordres de grandeur) ainsi que plusieurs nouvelles phases de violation de la symétrie CP. Un objectif important pour les expériences à venir est précisément la possibilité de contraindre ces paramètres.

Astrophysique, cosmologie et gravitation

La France a toujours joué un rôle majeur dans la recherche en astrophysique, en cosmologie et en gravitation de façon plus générale. Ces dernières années, les équipes théoriques dans ces domaines ont eu des contributions marquantes et à l’impact international, que ce soit en cosmologie primordiale, dans la physique de l’énergie noire, celle des grandes structures de l’univers ou des astroparticules, et évidemment dans la physique des ondes gravitationnelles. En particulier, les théories de la gravitation modifiée, introduites pour rendre compte de l’expansion accélérée récente de l’univers ou pour améliorer les propriétés ultraviolettes de la relativité générale, ont été au cœur d’une activité de recherche extrêmement dynamique à l’échelle internationale. Que ce soit les théories massives de la gravitation ou encore les théories tenseur-

scalaire, leurs constructions et leurs compréhensions doivent beaucoup aux équipes de physique théorique françaises. Ce domaine de recherche continue à porter ces fruits.

Même si la recherche en physique théorique a toujours été entièrement libre et si elle ouvre des directions originales, inattendues et prometteuses pour répondre aux grandes questions encore ouvertes sur notre Univers (nature du Big Bang et cosmologie quantique, inflation et modèles alternatifs, énergie et matière noire, trous noirs, *etc.*), elle garde toujours un œil bien ouvert sur les grandes expériences (dans lesquelles certains théoriciens sont concrètement impliqués) et même se structure autour des grandes campagnes observationnelles. Cela sera encore vraisemblablement le cas dans ces prochaines années.

En particulier, les détections récentes par les expériences LIGO/VIRGO de fusions d’objets compacts ont fait naître une vraie dynamique dans la communauté française et mondiale, ouvrant un champ immense de perspectives. Tout d’abord, il faut souligner l’expertise exceptionnelle de la communauté française de physique théorique dans le calcul de précision des formes d’ondes gravitationnelles émises par des systèmes binaires, plus particulièrement dans le régime post-newtonien mais pas seulement. Il conviendrait de maintenir cette expertise à ce niveau d’exception, compte tenu de l’importance que va acquérir la physique des ondes gravitationnelles dans un futur proche et lointain. Il est aussi important de souligner la nécessité de donner les moyens de soutenir et de développer une expertise numérique en relativité générale en lien avec les détections d’ondes gravitationnelles. Ensuite, la confirmation directe de l’existence de trous noirs, y compris super-massifs, et les premières estimations concernant leur abondance, interrogent déjà nos modèles cosmologiques qui se doivent d’expliquer leur présence. Enfin, l’accès inédit aux champs de gravitation forts va permettre de tester la relativité générale dans des domaines jusqu’alors inexplorés, et éventuellement d’observer des déviations qui pourraient nous

orienter vers une solution aux problèmes fondamentaux de la cosmologie : nature de l'énergie noire et de la matière noire, voire un guide vers la gravitation quantique.

La recherche en cosmologie théorique va aussi accompagner les missions Euclid et SKA, dont l'étude de la structure à très grande échelle de notre univers a pour but de comprendre la nature de l'énergie noire et de tester la relativité générale, mais qui fournira également des contraintes sur les fluctuations primordiales et notamment les non-Gaussianités. Leurs résultats sont attendus à plus long terme mais vont impacter profondément différents domaines, ce qui implique de se préparer au mieux en développant en France les expertises nécessaires.

Pour finir, notons que les mesures de haute précision du spectre local du rayonnement cosmique stimulent des efforts considérables de modélisation et créent des synergies entre de nombreux domaines : astrophysique des hautes énergies (via l'étude des sources conventionnelles), physique des particules (via l'étude de sources exotiques), physique des plasmas (via le transport de particules dans la turbulence ainsi que l'accélération de particules), physique nucléaire (via les sections efficaces), physique stellaire (via les sources), et même physique du milieu interstellaire (via les phénomènes d'ionisation). L'expérience AMS apporte des mesures d'une précision inégalée. Tandis qu'aux énergies extrêmes, la phénoménologie du rayonnement cosmique a été marquée par la détection d'anisotropies dans les cartes du ciel des directions d'arrivées, à différentes échelles et différentes énergies. Les résultats de l'observatoire Pierre Auger semblent confirmer l'origine extragalactique du rayonnement cosmique vers 10 EeV. En parallèle, le relevé profond du plan galactique au-delà de 200 GeV par la collaboration H.E.S.S. a permis d'étudier les populations d'objets accélérateurs de particules dans la Galaxie, parmi lesquels une majorité de nébuleuses de pulsar. Combinées aux observations Fermi-LAT, ces mesures couvrent plus de 6 décades en énergie et permettent une excel-

lent modélisation du cycle de vie du rayonnement cosmique.

Au niveau des perspectives, le rayonnement cosmique, après être devenu multi-longueur d'onde et multi-messager 'simple' (entre leptons et nucléons), devient multi-messager 'étendu' avec l'ouverture des ondes gravitationnelles. Ceci va probablement marquer une révolution thématique avec la montée en puissance du domaine de l'Univers transitoire.

Chapitre 2 : Physique Mathématique et Méthodes Théoriques

La physique mathématique irrigue l'ensemble de la physique théorique, des ondes gravitationnelles jusqu'à la matière condensée ou la physique classique des systèmes dynamiques. Elle fournit en effet des concepts bien formalisés et des résultats rigoureux qui sont des points d'appui essentiels pour une compréhension en profondeur des lois de la physique. La théorie des champs et le groupe de renormalisation sont des concepts unificateurs. La compréhension de leur structure mathématique continue de progresser, en lien avec des mathématiciens en nombre croissant et à l'aide d'outils tels que le calcul réurgent d'Ecalte ou les développements en vertex à boucles. La théorie des champs reste étudiée sous sa forme classique pour la physique des particules, mais aussi et de plus en plus sous des formes plus abstraites, en lien avec la quantification de la gravité.

Ce dernier problème est sûrement l'un des plus fondamentaux de toute la physique moderne. Il concerne le comportement à très petite échelle (on pourrait dire super-microscopique) de cette interaction. En effet, alors que la gravitation fut l'une des premières interactions fondamentales à être étudiée et comprise dans des processus "ordinaires" (gravitation de Newton) ou même relativistes (relativité générale), elle résiste jusqu'à présent à une compréhension microscopique équivalente à celle des autres interactions fondamentales.

Théories de cordes

Le chemin le plus étudié pour la quantification de la gravité et son unification avec les autres forces fondamentales est celui de la théorie des cordes. En théorie des cordes, les particules du modèle standard et le médiateur de la force gravitationnelle, correspondent aux excitations d'un objet étendu uni-dimensionnel, la corde. A basse énergie, la dynamique de la corde est décrite par des théories de champs, qui contiennent relativité générale et théories de jauge. La structure de la théorie est très riche et combine une grande variété d'idées physiques et mathématiques.

Les relations de symétrie (dualités) entre les différents types de théorie des cordes et l'existence d'objets étendus (D-branes) ont permis de trouver un grand nombre de relations plus ou moins inattendues entre différentes théories de champs supersymétriques. Leur étude a révélé des liens profonds avec la géométrie algébrique et énumérative d'un côté, et, de l'autre, a permis de retrouver ou découvrir de nouvelles structures intégrables et de faire le lien avec des progrès récents dans la théorie des représentations, des algèbres en amas ou des algèbres toroidales.

L'exemple le plus frappant de dualité en théorie de corde est celui de la correspondance holographique, où une théorie de champs fortement couplée en d dimensions est mise en correspondance avec une théorie de cordes sur un espace à courbure négative (anti de Sitter) en $d + 1$ dimensions. Cette correspondance, qui a été vérifiée en grand détail pour certaines théories super-conformes à grand nombre de degrés de liberté et avec supersymétrie maximale, notamment en utilisant les techniques de l'intégrabilité, est aussi explorée pour des théories plus réalistes et moins symétriques. En particulier elle fournit aussi une approche alternative aux outils numériques dans l'étude des systèmes fortement corrélés en matière condensée ou au régime de couplage fort de la QCD.

L'origine microscopique de l'entropie des trous noirs est une question centrale pour toute théorie de la gravité quantique. Un

succès de la théorie des cordes a été la dérivation de l'entropie en terme d'états de D-brane, grâce à des résultats avancés en géométrie algébrique et en théorie des nombres, pour des trous noirs supersymétriques en espace plat. Des progrès importants ont été aussi accomplis pour les trous noirs dans les espaces anti-deSitter, où, grâce à la dualité holographique, l'entropie du trou noir est calculée dans la théorie de jauge duale avec des techniques de localisation. La généralisation aux trous noirs non supersymétriques reste un problème ouvert.

Un autre problème fondamental reste la classification des vides de la théorie et la réduction des dimensions supplémentaires par compactification. Les propriétés des variétés de compactification sont centrales dans la dualité holographique et dans toute application phénoménologique de la théorie. Leur étude requiert des techniques sophistiquées en géométrie différentielle et algébrique. De nouvelles approches en mathématiques ont permis la construction d'un grand nombre de nouveaux vides et le développement de méthodes pour la construction des actions effectives en basse dimension. Les vides avec constante cosmologique négative et les actions effectives correspondantes ont des applications intéressantes en holographie. La construction de modèles utilisables en phénoménologie reste un problème ouvert, à cause de l'absence de contrôle sur les déformations des vides non Calabi-Yau. La construction de vides non-supersymétriques avec constante cosmologique positive (de Sitter) est encore plus problématique et discutée. Les exemples connus jusqu'à présent sont rares et peu satisfaisants. C'est d'ailleurs une des motivations de la conjecture de "marais" (swampland), qui exclut l'existence de vides de Sitter en théorie des cordes. La recherche de contre-exemples à la conjecture et d'explications alternatives pour la phase actuelle d'expansion de l'univers est un domaine très actif en lien étroit avec la cosmologie. La théorie de cordes, la dualité holographique et des méthodes issues de l'intégrabilité ont aussi motivé le développement de nouvelles techniques pour le calcul des amplitudes de diffusion en théories des

champs. Il s'agit désormais d'un domaine autonome. Parmi les progrès récents on peut citer l'évaluation avec des méthodes issues de l'intégrabilité de certaines intégrales de Feynman utiles pour la QCD, des résultats sur des déformations intégrables non-supersymétriques et des résultats allant au-delà de la limite dite planaire.

Gravité à boucles et modèles de tenseurs aléatoires

Outre la théorie des cordes, la gravitation quantique à boucles et les modèles de matrices et de tenseurs aléatoires sont particulièrement étudiés en France. L'idée de base de ces approches, dans lesquelles la communauté française se distingue particulièrement par sa créativité et son dynamisme, est d'adapter les méthodes de la théorie quantique des champs directement à la théorie d'Einstein de la relativité générale en considérant l'espace-temps et sa métrique comme les entités fondamentales. Une de leurs caractéristiques principales est de tenter de quantifier la gravitation sans se référer à un espace ou une métrique particulière dite de fond, contrairement à ce qui se passe dans les théories quantiques des champs habituelles. La gravité à boucles se base principalement sur des objets mathématiques appelés mousses et réseaux de spin. Même si elle n'a pas encore abouti à une théorie définitive, la communauté correspondante en France s'est tournée, ces dernières années vers l'étude d'aspects plus phénoménologiques en lien avec la cosmologie ou l'astrophysique.

En parallèle les modèles de matrices et de tenseurs aléatoires fournissent une somme sur les géométries de l'espace-temps pondérées par la courbure. Dans le cas des matrices il s'agit de gravité quantique à deux dimensions. Les travaux des dernières années utilisent des outils de combinatoire pour contrôler la métrique et ont achevé d'établir l'équivalence rigoureuse entre modèles de matrices et théorie de Liouville. La récurrence topologique d'Eynard-Orantin, dont le champ d'action

s'est beaucoup élargi, permet le calcul d'invariants topologiques importants à la fois en mathématique et en physique. Les recherches continuent aussi en théorie non-commutative des champs, qui sont une forme généralisée des modèles de matrices.

L'étude des modèles de tenseurs, qui étendent en rang plus élevé la notion de matrices aléatoires, a été relancée à partir des années 2010 par la découverte de leur limite analytique de grande taille, dite melonique. En 2015 cette même limite s'est indépendamment révélée la clé de la solution du modèle de Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) qui est une théorie presque conforme à une dimension saturant la borne de chaos maximal, donc un modèle holographique de trou noir quantique en espace anti-de Sitter à deux dimensions. La relation entre le modèle SYK et les modèles de tenseurs, proposée par Witten dès 2016, reste à approfondir et élucider. Il est cependant déjà acquis que les modèles de tenseurs fournissent de nouveaux exemples de théories conformes explicitement solubles. Leurs applications, en matière condensée comme dans l'analyse de données, sont appelées à se développer fortement dans les prochaines années sous l'impulsion de l'école française, fondatrice en ce domaine.

Systèmes intégrables

Les systèmes intégrables présentent un intérêt tout particulier pour le physicien car il est possible de calculer exactement, et souvent analytiquement, leurs grandeurs physiques caractéristiques. La raison essentielle en est un cadre mathématique très structuré qui entraîne assez de contraintes (symétries) pour rendre le modèle soluble. Bien que ces systèmes n'existent essentiellement qu'en dimensions 1 et 2, ils fournissent un formidable laboratoire d'étude pour tester des conjectures ou des hypothèses inaccessibles par ailleurs. Leur domaine d'application est vaste et recouvre des aspects très variés de la physique des hautes comme des basses énergies (théorie des cordes, théories de jauge supersymétriques, correspondance AdS/CFT, matière condensée,

physique statistique, *etc.*). Des développements expérimentaux récents permettent maintenant de tester les prédictions intégrabilistes avec un accord souvent remarquable, et même de prédire de nouveaux phénomènes liés à l'intégrabilité (absence de thermalisation). Enfin, les systèmes intégrables gardent de fortes connections avec les mathématiques : on pourra par exemple noter les travaux récents sur les polynômes orthogonaux, dans un cadre algébrique basé sur l'approche intégrabiliste.

Dans le cadre des systèmes intégrables quantiques, les progrès réalisés aux cours des dernières décades permettent actuellement d'avoir une bonne description de la physique à l'équilibre (calcul du spectre, mais aussi des fonctions de corrélation) des modèles les plus simples solubles par les techniques d'ansatz de Bethe, tels que la chaîne de Heisenberg de spins 1/2 ou le gaz de Bose unidimensionnel.

L'un des défis actuels du domaine concerne la généralisation de ces résultats à des modèles pour lesquels la méthode usuelle d'ansatz de Bethe ne peut pas être directement utilisée, ou produit un cadre calculatoire beaucoup plus compliqué. Dans ce but, de nouvelles approches (modifications de l'ansatz de Bethe algébrique, raffinement de la version quantique de la méthode de séparation des variables...) ont récemment été développées. Celles-ci ouvrent la voie à la résolution de toute une classe de modèles qui, bien que qualifiés d'intégrables, n'étaient encore pas véritablement résolus, tels que par exemple les modèles avec des conditions au bord arbitraires, utiles pour modéliser les phénomènes de transport. Une autre avancée récente significative concerne la résolution de modèles intégrables avec des degrés de liberté internes, pour lesquels la complexité des calculs empêchait jusqu'alors d'obtenir des résultats exploitables : ces nouveaux résultats sont particulièrement importants pour leurs applications potentielles au calcul d'amplitudes de diffusion dans les théories de jauge supersymétriques.

Par ailleurs, l'étude de la dynamique hors d'équilibre des systèmes quantiques isolés est en plein développement, et les systèmes inté-

grables jouent un rôle central dans l'élaboration de nouveaux paradigmes. Ainsi, pour décrire la relaxation d'un système intégrable, il est nécessaire de faire appel à la notion d'ensembles de Gibbs généralisés, introduite tout récemment. D'autre part, une description hydrodynamique de leur limite continue (macroscopic fluctuation theory, MFT) a été récemment proposée comme une version hors équilibre de la thermodynamique. Les systèmes intégrables permettent de décrire de manière microscopique des modèles dont la limite à volume infini (et/ou la limite continue) est décrite par la MFT, et permettent ainsi de tester cette théorie.

Théories conformes

Les théories conformes exploitent elles aussi un cadre mathématique pour décrire la limite d'échelle des modèles critiques. L'approche dite du bootstrap conforme a amplement montré sa puissance pour le calcul des exposants critiques, non seulement dans le cas très contraint de la dimension 2, mais aussi plus récemment en dimension supérieure. On peut noter aussi l'étude de déformations calculables des théories conformes à deux dimensions en termes du tenseur énergie-impulsion. Un défi toujours actuel concerne la construction et l'étude de théories non-unitaires permettant de décrire des phénomènes non-locaux tels que la percolation. C'est un sujet très actif, à la croisée de différentes approches (construction de représentations non semi-simples de l'algèbre de Virasoro donnant lieu à des théories logarithmiques, modification du bootstrap conforme, analyse des limites d'échelles de modèles intégrables sur réseau possédant la symétrie de Temperley-Lieb), et certainement amené à se développer dans les prochaines années.

Chapitre 3 : Matière condensée et systèmes quantiques

Pendant la dernière décennie le paysage de la matière condensée en France était très large-

ment influencé par le développement d'expériences sur des systèmes synthétiques tels que les systèmes d'atomes piégés individuellement, les circuits supraconducteurs ou les nanostructures à semiconducteur qui offrent des plateformes novatrices dans les thèmes de la matière condensée et de la physique quantique à N corps en interaction forte. Ces développements en basse dimension ont permis de construire des systèmes expérimentaux "idéaux" possédant un accord sans précédent avec les modèles théoriques. En conséquence, de nombreuses portes se sont ouvertes vers les phases topologiques, les technologies quantiques et le problème à N corps quantique en général.

Du côté des matériaux, la question clé encore non résolue reste l'origine microscopique de la supraconductivité à haute température. La recherche de systèmes expérimentaux "idéaux" et de nouveaux matériaux s'intensifie, particulièrement ceux montrant des phases de liquides quantiques, des phases topologiques et des théories de jauge émergentes.

Dans un futur proche, la recherche en technologie quantique et en information quantique, comme le développement des réseaux artificiels des q-bits, va s'intensifier. Les tendances pour les phases topologiques vont vers les systèmes de fermions fortement corrélés et vers une classification complète de toutes les phases topologiques possibles. La dynamique des systèmes quantiques ouverts et les trempe quantiques continueront de jouer un rôle majeur dans le paysage avec par exemple l'évolution vers deux dimensions. Nous voyons aussi l'arrivée d'une révolution numérique avec les nouvelles techniques comme les réseaux de tenseurs qui donnera un accès détaillé aux systèmes intriqués, ainsi que le développement de techniques d'apprentissage profond pour le traitement des données et l'optimisation d'algorithmes numériques.

Ci-dessous nous développons ce rapport dans plusieurs directions spécifiques. Ce choix est évidemment non-exhaustif mais reflète en partie les activités effectuées au sein de la section.

Matériaux quantiques et émergence

La découverte, il y a plus de trente ans des supraconducteurs à haute température a motivé une véritable explosion de l'étude des systèmes de fermions fortement corrélés et de la recherche de nouveaux matériaux possédant des phases exotiques quantiques. Trente ans plus tard le problème de la supraconductivité est toujours là et plusieurs phénomènes, comme la phase dite "pseudo-gap", précurseur de la phase supraconductrice, restent inexpliqués. La recherche des états proches de l'état "resonating valence bond" d'Anderson a donné naissance à la notion de liquide de spin. La chasse aux liquides de spin quantiques, ouverte depuis dix ans a fortement contribué à l'étude de l'intrication pour le problème à N corps et pour les phases topologiques. Un concept important, associé à ces phases liquides, est la description en termes de champs de jauge émergents, qui définit un cadre théorique extrêmement attirant et créant les liens importants avec les théories de champ à haute énergie. Dans ce cadre on peut citer la famille de matériaux et modèles sur réseau de pyrochlore fournissant des liens très proches entre théorie et expérience.

Topologie

L'utilisation de la topologie évolue actuellement en physique au-delà du domaine initial de description des électrons dans les solides. Après les grands succès que ce domaine a connu, tels que la classifications des isolants et supraconducteurs topologiques ou la maîtrise de l'effet Hall quantique entier et fractionnaire, la caractérisation des propriétés topologiques des ondes mécaniques, de la lumière ou des mélanges lumière-matière est actuellement en plein essor. Ces développements touchent donc la matière condensée, la mécanique des fluides, les technologies quantiques et la simulation quantique. On peut citer par exemple l'application des concepts topologiques aux modes d'écoulement de vent équatorial.

Au-delà de ces progrès, un nouvel axe de recherche important est la réalisation expérimentale de nouvelles phases dans lesquelles les interactions et la topologie s'associent, qui a immédiatement entraîné de nouveaux défis théoriques. L'objectif est ici la découverte de phases analogues et généralisant l'effet Hall quantique fractionnaire. Deux axes peuvent être mentionnés: (i) la réalisation de telles phases dans des réseaux d'atomes froids *via* des champs de jauge artificiels, (ii) les phases isolantes et supraconductrices dans les phases de Moiré de bicouches de graphène.

Systèmes synthétiques et technologie quantique

L'étude des systèmes synthétiques se nourrit sans cesse de très belles avancées technologiques. Comme exemple on peut citer le domaine de la physique atomique, où l'on peut piéger de plus en plus finement les atomes de manière individuelle dans des géométries arbitraires en utilisant les réseaux optiques. Ces réalisations expérimentales ont atteint un régime de cohérence et de contrôle menant à des opportunités nouvelles pour l'étude approfondie des systèmes quantiques à N corps et motivant des avancées théoriques remarquables. Plusieurs autres plateformes de simulateurs quantiques sont en cours de développement, notamment des ions piégés, des réseaux de q-bits supraconducteurs ou des points quantiques et des cavités et circuits d'électrodynamique quantique. Ce domaine de recherche avance très vite, motivant le développement de protocoles permettant de mesurer le spectre d'intrication, des indicateurs de chaos quantique, la détection d'ordre topologique mais aussi la caractérisation des états exotiques de la matière et les transitions de phases correspondantes.

Comme il devient possible de réaliser en laboratoire des systèmes contrôlables permettant de tester certains modèles de physique théorique, on peut anticiper qu'un nombre croissant de modèles testables en laboratoire pourront alors être imaginés par les théoriciens. On peut aussi penser que des aspects

propres aux systèmes réalisés devront être incorporés dans les analyses théoriques.

La manipulation d'états quantiques cohérents de plus en plus complexes continuera à être un domaine très actif avec l'objectif ultime de construire un ordinateur quantique. De multiples questions seront abordées: dans la mesure où l'on cherche à coupler des systèmes quantiques de nature différente (photons, q-bits à base de supraconducteurs ou semi-conducteurs, nano-oscillateurs mécaniques...), quelle est la forme du couplage entre des systèmes quantiques de nature très différente? Une physique nouvelle peut-elle émerger dans le contrôle dynamique à haute-fréquence (du GHz au THz) de ces objets? Existe-t-il des limites physiques ultimes au nombre d'objets quantiques qui peuvent être manipulés de façon cohérente dans un système réel?

Ces frontières de cohérence d'un système quantique à N corps mènent à la question de la "suprématie quantique", à savoir à l'idée que dans un futur très proche une machine quantique (c'est-à-dire un ensemble de processeurs quantiques) puisse donner l'évolution d'un état d'un système de N q-bits pour un N plus grand et/ou un temps plus longs que ceux atteignables par tous les algorithmes et les plateformes de calcul classiques.

De façon plus générale, la physique mésoscopique devrait continuer à examiner les propriétés nouvelles qui peuvent émerger lorsque deux matériaux aux propriétés distinctes sont combinés dans une hétérostructure. De grands progrès sont en cours dans le domaine des "matériaux quantiques" aux propriétés de mieux en mieux contrôlées (matériaux 2D tels que le graphène ou les dichalcogénures, par exemple). Ils ouvrent des perspectives pour la réalisation de jonctions hybrides avec des propriétés encore inexplorées.

Dynamique quantique et systèmes hors équilibre

La recherche de nouvelles fonctionnalités dans les matériaux quantiques a été étendue

aux états hors équilibre. En conséquence, de nombreuses facettes de la dynamique des systèmes quantiques apparaissent dans les projets de la recherche de la section 02. Beaucoup de progrès ont été réalisés dans les problèmes de trempes dans des systèmes unidimensionnels et sur la formation des états quasi-stationnaires, où les techniques des systèmes intégrables ont été très importantes (voir Sec. 1.2). Des avancées notables ont été également réalisées dans l'ingénierie de Floquet sous contrainte externe périodique en temps. À court terme on peut espérer voir des progrès dans les régimes dépendants du temps, les états préthermiques et les "cicatrices quantiques". Comment aborder les systèmes au-delà de la dimension 1 est une question qui commence à être étudiée, mais ce domaine présente des défis considérables. Un autre problème qui attire l'attention concerne des trempes à une densité d'énergie dans un système proche d'une transition de phase à température finie (en une dimension ceci n'est possible que si l'on a des interactions à longue portée). D'autres directions de recherche impliquent des systèmes ouverts et on s'attend à ce qu'ils attirent une grande attention.

Une autre classe de systèmes, où la dynamique quantique est très intéressante, est celle des systèmes désordonnés en interaction. Les effets de désordre, sous la forme de localisation à N corps (MBL), restent un sujet de grand intérêt où la nature de la transition dans les systèmes unidimensionnels reste à comprendre en détail. Par exemple le rôle de la nature du désordre, ou l'importance des événements rares sont des thèmes d'actualité. Si les simulations numériques indiquent la possibilité d'un régime MBL en deux dimensions à temps long, l'existence ou non d'un tel régime reste une question très difficile à résoudre.

Méthodes et algorithmes

Le progrès scientifique avance main dans la main avec les développements techniques. Comme exemple on peut citer l'étude de la transition métal-isolant par la technique "DMRG" ou l'avancée de notre compréhension

de la structure de l'intrication des hamiltoniens locaux obtenue grâce à des méthodes de réseaux de tenseurs. La correspondance AdS-CFT a permis une nouvelle interface entre la physique des hautes énergies et la matière condensée. Cette correspondance a ouvert la voie à un véritable échange des cultures et des méthodes de théorie des champs dans les deux domaines, révélant par exemple des phénomènes holographiques ou électrodynamiques émergent en basse énergie ou menant à des correspondances grâce au modèle de Kitaev.

L'augmentation incessante de la puissance numérique repousse continuellement les nouveaux horizons de la recherche. Nous avons déjà noté les avancées potentielles vers la suprématie quantique, mais en contrepartie on note que la notion de ce qui est "atteignable" théoriquement par les méthodes classiques (pour traiter les problèmes quantiques) est aussi en évolution. Au-delà de la diagonalisation exacte, la frontière de la simulation classique repose sur les approches variationnelles, la DMRG en étant un archétype de puissance remarquable mais qui a aussi des limitations importantes. Cependant de nombreux autres ansätze variationnels sont à l'étude en ce moment – par exemple un ansatz qui rencontre un immense succès est basé sur la paramétrisation des coefficients de la fonction d'onde sous la forme d'un réseau de neurones. D'autres encore se prêtent essentiellement au même traitement théorique.

Comme on a vu dans ce chapitre, un grand défi pour toutes ces méthodes dans un proche avenir est le passage de ces techniques vers la dimension $d = 2 + 1$ pour accéder aux systèmes bidimensionnels à température nulle, à température finie et en présence de désordre.

L'apport des techniques d'apprentissage automatique – "machine learning" en anglais (ML) – à la physique de la matière condensée est considérable, car comme pour de nombreuses autres branches des sciences, les techniques de ML aident à résoudre des systèmes complexes. Un exemple est donné par le traitement des données d'expériences de diffusion de neutrons dans un espace multi-dimensionnel. Au-delà d'applications directes comme la

reconnaissance de phases à partir d'images de simulations numériques ou d'expériences, les techniques de ML sont amenées à se coupler avec d'autres approches numériques déjà existantes pour développer de nouveaux algorithmes Monte Carlo : les méthodes Monte Carlo variationnelles (à ansatz de fonctions d'onde en réseau de neurones, "deep autoregressive networks"), les méthodes de réseaux de tenseurs (qui vont bénéficier de la différentiation automatique), ou les méthodes de l'apprentissage par renforcement.

Chapitre 4 : Physique statistique, physique non-Linéaire et applications

La physique théorique reste une source incomparable de développements conceptuels majeurs pour la physique classique, par l'intermédiaire d'une part de la physique statistique et d'autre part des systèmes dynamiques et des phénomènes non-linéaires. Au-delà de leurs progrès fondamentaux propres, ces domaines sont au cœur d'avancées majeures en biophysique, physique des réseaux, turbulence, plasma, machine learning, économophysique, et dans l'étude de systèmes dynamiques complexes comme le climat. L'impact des méthodes de physique théorique est très fort, car elles apportent des outils qui formalisent la compréhension de leurs dynamiques et de leurs structures complexes.

Physique statistique à l'équilibre

La physique statistique à l'équilibre permet d'expliquer des lois macroscopiques thermodynamiques à partir de descriptions microscopiques. On peut désormais décrire dans ce cadre des systèmes dont la structure est de plus en plus riche (solutions, fluides complexes, réseaux, vivant). L'étude des systèmes désordonnés, des verres aux interfaces rugueuses et réseaux complexes, a été le théâtre d'avancées majeures. La généralisation de concepts développés pour des systèmes idéaux (en "dimension infinie") vers des systèmes réalistes a apporté une moisson de résultats et de mé-

thodes. Ainsi, les transitions et les lois d'échelles universelles de certains systèmes vitreux ont été élucidées. De nouveaux outils numériques (algorithme de "swap", apprentissage profond, algorithmes d'événements rares, "event-chain Monte Carlo") permettent de sonder des échelles de temps et d'espace inaccessible auparavant. Certains systèmes, comme les solutions denses, les émulsions, les empilements, présentent un "désordre structurel" (généralisé par les configurations) qui a longtemps été très difficile à saisir par des outils autres que numériques. De nouvelles méthodes analytiques basées sur l'étude des excitations et des défauts ont été la source d'avancées considérables pour l'étude du vieillissement dans les milieux granulaires ou la transition de "jamming" (qui décrit l'effondrement ou la stabilisation d'empilements). Les concepts qui en ont émergé (transitions de phase reliées à la complexité, nouvelles classes d'universalité) sont bien cernés sur des modèles spécifiques et leur généralisation va jouer un rôle important dans les développements futurs de la physique statistique.

Physique statistique hors d'équilibre

De nombreux systèmes sont décrits par un grand nombre d'agents en interaction irréversibles. Les bactéries, les oiseaux ou les piétons ont ceci en commun de dissiper de l'énergie pour se propulser, et sont décrits dans le cadre de la "matière active". Des concepts d'équilibre comme la pression, la tension de surface, ou la notion d'équation d'état, deviennent mal définis dans ces systèmes hors d'équilibre. Les outils de physique théorique (théorie des champs) sont essentiels pour développer de nouveaux concepts pertinents. Par exemple, la description de la séparation de phase induite par la motilité a inspiré la définition et la résolution de modèles en interaction, dans le régime non-perturbatif de certains phénomènes actifs.

L'équation de Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) et sa classe d'universalité sont paradigmatiques de nombreux systèmes hors équilibre, par

exemple la croissance de surfaces et d'interfaces. Pendant la dernière décennie, la description complète et exacte de ses fluctuations a renouvelé ce domaine. Des retombées majeures ont été visibles au-delà de la physique statistique, en matière condensée (dynamique de fermions piégés) ou en physique mathématique (intégrabilité). Ces résultats ouvrent la voie à la compréhension générique de l'interaction entre désordre et force conduisant un système hors d'équilibre, particulièrement importante au niveau fondamental (transition de dépiégeage) et pour les applications (tremblements de terre, phénomènes d'avalanche).

Au niveau méthodologique, la théorie des grandes déviations a joué un rôle majeur pour décrire les fluctuations et les événements rares. Le "théorème de fluctuation" permet par exemple de concevoir des protocoles de changement d'état en temps fini. Des avancées théoriques ont permis de comprendre les fluctuations d'observables dynamiques et de concevoir des algorithmes pour étudier les fluctuations rares, avec de nombreuses applications allant de la théorie cinétique à l'étude des extrêmes dans des modèles de climat.

Systèmes dynamiques, physique non-linéaire et turbulence

La France a une tradition forte d'une approche physique, à l'interface avec la physique statistique, des problèmes fondamentaux en mécanique des fluides, en turbulence, et en dynamique des plasmas. Elle possède aussi des groupes uniques d'expérimentateurs visant une science directement couplée à ces questions fondamentales et donc parfaitement intégrés dans la section. Il est notable que les équipes françaises ont obtenu en 2019 deux financements de la fondation Simons, en turbulence et turbulence d'ondes.

Ces dernières années, la théorie des systèmes dynamiques a été très active dans les domaines de la dynamique des réseaux complexes, de la caractérisation des extrêmes, des bifurcations, et du couplage des questions théoriques associées avec la théorie des gran-

des déviations. De nombreux progrès ont également été obtenus sur les comportements thermodynamiques des systèmes dynamiques et la caractérisation statistique de la production d'entropie et les théorèmes de fluctuation. La turbulence d'ondes étudie les propriétés statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction. Au cours des dernières années, la France a joué un rôle de premier plan pour la confrontation de la théorie de la turbulence faible à des travaux expérimentaux, et pour ses applications à de nombreux domaines. Une recherche interdisciplinaire entre physique statistique, physique non linéaire, et mathématique a été initiée en France et a été reconnue au niveau international.

Dans le domaine de la turbulence développée, la construction de champs aléatoires avec les propriétés spécifiques des champs turbulents, et l'étude de l'intermittence et des structures qui conduisent à l'anomalie dissipative, sont parmi les questions fondamentales. De nombreux progrès ont été enregistrés, par exemple des mesures récentes de vitesse à très haute résolution suggèrent que cette anomalie est associée à des événements extrêmes à très petite échelle, qui pourraient être la signature de quasi-singularités des équations de Navier-Stokes.

En modélisation lagrangienne de la turbulence de nombreuses questions fondamentales sont d'importance stratégique pour le transport de polluants, les nuages, la dynamique de l'atmosphère. Les outils théoriques qui permettent de décrire les processus d'instabilité et ou de cascade inverse qui engendrent une dynamique à grande échelle couplée à une turbulence à toutes les échelles suscitent un grand intérêt en géophysique et en astrophysique.

Les nouveaux outils de mesure comme les caméras rapides à haute résolution, ainsi que les nouveaux outils d'apprentissage automatique se développent rapidement dans tous les domaines de la turbulence et des plasma et permettent d'envisager des avancées majeures. Après les succès de développement d'écoulements cryogéniques en hélium normal et superfluide, le mécanisme de dissipation en turbulence superfluide et son lien avec les tour-

billons quantiques restent une question fondamentale ouverte.

La communauté est très impliquée dans l'étude fondamentale des plasmas soit par des modèles de type fluides ou cinétiques soit par la modélisation numérique. De nombreuses expériences émergent (instabilités, dynamo, chocs, jets...) dans des gammes variées de paramètres et en couplage fort avec les développements théoriques.

La communauté de physique théorique a contribué à résoudre des problèmes importants de la dynamique du climat, qui échappaient aux approches traditionnelles : calcul d'extrêmes dans les modèles climatiques avec un temps de calcul raisonnable, propriétés topologiques des fluctuations de la dynamique atmosphérique équatoriale, problèmes de mélange turbulent en océanographie, calcul et caractérisation de transitions rares entre attracteurs en dynamique de l'atmosphère (changements abrupts de climat). Ces approches devraient être fructueuses dans le futur pour améliorer les paramétrisations sous mailles, source principale d'incertitude des modèles de climat, en utilisant théorie et apprentissage automatique.

Physique du vivant

La biophysique construit des théories quantitatives pour décrire le fonctionnement des organismes vivants. Ces organismes obéissent aux mêmes lois physiques que le reste du monde mais leur fonctionnement implique des processus originaux : évolution (événements rares), représentation plastique de l'environnement (avec une précision stupéfiante), décisions irréversibles. La caractérisation de leurs conséquences, de leur stabilité et de leurs limites physiques (bruit, coûts énergétiques imposés aux systèmes biologiques) reste un défi.

Les systèmes vivants sont d'excellents exemples du principe "more is different" de la physique à N corps. Leurs interactions fortes, non-linéaires et hors d'équilibre nous mettent au défi de trouver des descriptions effectives

qui rendent compte du comportement observé. En écologie comme en neuroscience émergent des phénomènes collectifs souvent hors d'équilibre. D'une part, la physique existante explique les comportements complexes observés en biologie, comme les attracteurs de mémoire, la chimiotaxie ou la navigation. D'autre part, les systèmes biologiques incitent à découvrir de nouveaux principes physiques ou états de la matière : la matière active observée chez les animaux ou les transitions de phase dans les tissus. La biophysique utilise des méthodes venant de l'informatique, de la théorie de l'information et de la théorie du contrôle pour analyser les données à grande échelle. Elles offrent une amélioration conceptuelle essentielle pour la compréhension de ces données et de leur liens avec les mécanismes physiques.

Nous manquons de cadres bien établis en biophysique théorique, ce qui en fait un domaine où l'analyse statistique des phénomènes observés à travers différentes échelles conduit à des modèles abstraits. Les défis vont au-delà de la modélisation mathématique : il s'agit d'identifier les principes et les lois de la biologie, et de construire des théories phénoménologiques du vivant pour comprendre la reproductibilité, la précision et la prévisibilité.

Inférence statistique et algorithmes

L'apprentissage automatique (ML, voir plus haut) jouera probablement un rôle majeur dans la société et dans le développement des sciences dans le futur. Ce domaine a bénéficié de l'influence de la physique statistique depuis ses débuts, voir par exemple la machine de Boltzmann ou l'échantillonnage de Gibbs et est un domaine en plein essor. La compréhension théorique du ML requiert l'analyse de problèmes en grandes dimensions, ce qui constitue la spécialité de la mécanique statistique. Les méthodes de la physique des systèmes désordonnés s'avèrent puissantes pour décrire et comprendre des modèles des réseaux de neurones et le comportement dynamique des algorithmes d'apprentissage. Les physiciens contribuent aussi aux algorithmes basés sur le

maximum de vraisemblance ou des techniques d'optimisation, grâce aux modèles physiques sous-jacents. Les physiciens ont surmonté des questions qui étaient des défis pour les mathématiciens, par exemple en identifiant des transitions de phase. Ceci a permis de concevoir de nouveaux algorithmes puissants.

La physique apporte aussi une myriade de problèmes bien posés avec des données provenant d'une source bien décrite pour utiliser et développer les méthodes de ML. Les algorithmes de ML, utilisés comme un outil pour définir et construire des modèles prédictifs, nous aideront à mieux comprendre les systèmes physiques tout en éclairant l'interprétabilité des résultats d'apprentissage automatique, qui restent parfois mystérieux.

Science des réseaux et sciences humaines

La "révolution des données" a permis de représenter par des réseaux complexes des systèmes très divers, dans les domaines de l'informatique (internet, réseaux pair-à-pair), de la biologie (réseaux de régulation génétique, écologie), des sciences sociales (réseaux sociaux, réseaux en ligne), de la finance (réseaux bancaires) ou de l'épidémiologie (propagation de maladies).

La physique statistique joue depuis toujours un rôle moteur dans ce domaine, grâce à sa capacité unique à prédire et décrire les phénomènes émergents (corrélations, lois d'échelles, concept d'universalité), à modéliser des processus dynamiques (transitions de phase hors équilibre, bifurcations). Les algorithmes performants pour détecter des structures, et les outils de ML montrent des résultats prometteurs. De nombreux problèmes restent ouverts dans le domaine nouveau des réseaux multiplexes (liens pondérés) et temporels (liens évolutifs). La France a des atouts majeurs grâce à son excellence en physique statistique mais souffre de barrières institutionnelles au développement de cette interdisciplinarité.

Outre les réseaux complexes, les applications aux sciences humaines comprennent des

approches permettant d'interpréter la réalité économique sans passer par l'hypothèse d'équilibre en économie, avec un fort impact économique et politique potentiel.

1.3 La section 02 et ses interfaces

- De part leur nature visant à étudier la dynamique de systèmes complexes et les phénomènes émergents, la physique statistique et les systèmes dynamiques jouent un rôle majeur dans le développement de sciences interdisciplinaires avec la biophysique, l'informatique, les mathématiques, les sciences du climat et les sciences sociales.

Comme nous avons détaillé en Chapitre 4, il existe plusieurs domaines distincts de physique théorique en lien direct avec des développements en biologie, au niveau d'inférence ainsi que de construction des modèles hors d'équilibre. Les liens forts existent aussi entre épidémiologie, informatique, climatologie, économie et sociologie. La turbulence est fortement couplée aux sciences de l'environnement, à la biologie et à l'ingénierie. La physique statistique joue un rôle majeur dans le développement de l'apprentissage automatique. En conséquence, la section 02 a des interfaces avec les sections 05, 06, 07, 10, 11, 17, 19, 37, 41, et 51.

- Il existe un recouvrement avec la section 01 sur la phénoménologie des hautes énergies (physique aux collisionneurs, physique hadronique, astroparticules, cosmologie) et sur la physique nucléaire. Pendant la mandature actuelle, la section 01 a recruté de manière régulière des théoriciens affectés dans des laboratoires IN2P3, et une année des membres de notre section ont participé au Jury de la section 01. Dans le passé les deux sections ont échangé des postes. Nous avons aussi des chercheurs que nous évaluons ensemble. Nous sommes très ouverts et favorables à ces échanges entre l'INP et l'IN2P3. Cependant, la physique théorique des hautes énergies, des astroparticules, et du cosmos, a une compo-

sante qui n'est pas liée à l'interprétation de, ou aux calculs pour, une expérience spécifique. Cette composante est plus spéculative, mais elle joue un rôle important pour sa créativité et son dynamisme. Le recrutement au sein de notre section, et l'affectation dans des laboratoires INP sont des éléments clés pour garder cette composante.

- En cosmologie nous avons souvent des candidats en commun avec la section 17. Des considérations similaires valent pour ce cas.

- Les méthodes développées en physique mathématique, au cœur de notre section, ont des applications dans tous les domaines de la physique. En conséquence on compte des interfaces fructueuses avec la physique des particules, la matière condensée et la mécanique statistique ainsi qu'avec la section 41 à l'INSMI voir l'introduction.

- On reçoit des candidatures communes avec la section 03 pour la matière condensée, la 04 pour la technologie quantique, les systèmes optiques et l'interface laser atomes froids, et la 05 pour la matière molle. Dans ces recouvrements nous sommes donc très complémentaires des autres sections. Ce qui démarque nos choix dans les concours est l'approche de théoricien.ne.s spécifique à la 02.

1.4 Sujets émergents

En tant que comité de sélection et d'évaluation des chercheurs nous sommes un véritable observatoire des sujets émergents ainsi que de ceux en déclin ou en transformation.

En physique fondamentale, un des grands résultats scientifiques obtenus pendant notre mandat est, évidemment, l'observation pour la première fois des ondes gravitationnelles, par le biais d'un événement spectaculaire de coalescence entre trous noirs. La communauté de physique théorique française en général et la section 02 en particulier ont joué un rôle *important* dans cette avancée remarquable. Cela se reflète dans le nombre important de

candidats travaillant dans ce domaine et dans nos recrutements.

Nous remarquons la transformation ayant lieu dans le développement des théories au-delà du modèle standard, qui délaissent de plus en plus l'idée de la "naturalité" comme principe guide, pour se focaliser sur une approche purement de théorie effective. L'absence de signature expérimentale claire met en avant les théoricien.ne.s capables de penser en dehors des sentiers battus, et de traduire leurs idées en des propositions d'expériences authentiquement nouvelles – voir fin de Chapitre 1. En fait, sortir des sentiers battus, ou alors pousser au maximum les frontières des techniques "standard", sont deux caractéristiques récurrentes de la plupart de nos recrutements dans tout le chapitre des hautes énergies.

En physique mathématique nous avons déjà noté la synergie remarquable entre la communauté des systèmes intégrables, la matière condensée et la mécanique statistique sur la dynamique des systèmes quantiques en basse dimension. Ceci est un domaine en pleine explosion dans lequel nous recevons de nombreuses candidatures de niveau exceptionnel et dans lequel nous avons fait plusieurs recrutements. Il faut également noter l'émergence rapide des tenseurs aléatoires comme outil fédérateur aux multiples applications, de la géométrie aléatoire à l'analyse tensorielle de données en composantes principales.

L'étude et le développement de technologies quantiques basées sur l'établissement de cohérence quantique sur les échelles de temps et/ou de l'espace au-delà de l'échelle microscopique est une activité majeure en matière condensée depuis dix ans. Cette activité s'est encore accrue depuis le début de notre mandat, catalysée par les investissements considérables dans ce domaine. Cela se traduit par une forte augmentation du nombre des candidats travaillant sur ces aspects tels que l'information quantique, la topologie ou la simulation quantique, ou sur des sujets plus liés aux avancées expérimentales comme l'interface entre matière et lumière ou l'optique quantique non-linéaire.

L'apprentissage automatique ou “machine learning” (ML) est un sujet en pleine explosion. Ces techniques, ainsi que les algorithmes sous-jacents, révolutionnent la manière dont la science est réalisée. La contribution de notre section comporte deux volets : les développements conceptuels, comme nous avons vu en Chap. 4, et les applications dans tous les domaines, de la physique au-delà du Modèle Standard à la biophysique en passant par la matière condensée, la turbulence et le climat – voir Chap. 1, 3 et 4 ci-dessus. Le ML est aussi liée aux développements mathématiques, comme par exemple dans ses applications au groupe de renormalisation (RG). Enfin, sur le plan algorithmique, les limites d'applicabilité du ML constituent un domaine de recherche actif, où les méthodes approximatives nourrissent le travail des mathématiciens.

Les applications de la physique statistique, des systèmes dynamiques et de la turbulence à la dynamique du climat et aux systèmes environnementaux (voir Chapitre 4) est un autre sujet émergent où la France est particulièrement bien représentée.

2. SWOT pour la section 02

Pression – Nous avons déjà mentionné dans le texte la très forte pression sur les postes du concours chercheurs, et même pour les promotions, notamment vers DR2 et vers DRCE1. Cette pression peut être vue comme une force de notre section, car elle démontre à la fois l'intérêt des candidats, et elle garantit une grande qualité dans les embauches et les promotions. En même temps, il y a un effet de seuil au-dessus duquel la pression devient une menace : trop souvent, des candidats exceptionnels sont exclus du concours. Notre pression – qui se traduit par exemple en environ 50 candidat.e.s. pour une embauche dans le concours chercheurs CR – est bien au-dessus de ce seuil.

Par ailleurs, fortement couplée à cette pression, l'absence cruelle de postes ouverts à l'université, a des conséquences doublement néfastes : l'absence d'un vrai plan alternatif au CNRS pour une carrière de chercheur.e en France, et même la mise en péril de l'enseignement et de la recherche en physique théorique. Notamment, de plus en plus les doctorants et post-doctorants renoncent à embrasser ce domaine *par manque de perspective*.

Parité – En section 02 nous sommes très loin de la parité dans le nombre d'hommes et de femmes. Le pourcentage des femmes postulant dans le concours chercheurs est autour de 12%. Nous remarquons également un faible taux de candidature à tout niveau. Un exemple extrême est celui du concours DR2, avec de l'ordre de 40 candidats et parfois une seule candidate.

Nous sommes pleinement conscients de notre responsabilité dans les recrutements et promotions pour contribuer à redresser la situation. Jusqu'à présent, et grâce à des candidates de niveau scientifique exceptionnel, nous avons eu la chance de pouvoir établir un taux de recrutement et de promotion de femmes plutôt au-dessus de la moyenne de notre section : entre 20 et 25% dans le concours chercheurs ainsi que dans les promotions vers DR2. En perspective, augmenter la fraction de femmes dans notre section demande d'abord un encouragement aux femmes de tenter l'aventure de chercheuse en physique théorique. Notre section s'engage à œuvrer pour faire passer ce message. Ensuite, l'aide de la Direction du CNRS et de l'INP, en gardant un nombre suffisant de postes d'embauche et de promotions, nous est également *indispensable pour lutter contre le découragement*. La forte pression sur les postes d'entrants au CNRS et à l'université est particulièrement néfaste pour la parité. Nous avons noté une réduction du nombre de candidates pendant notre mandat et tout indique que ce fait reflète les évolutions dans les centres de formation. Nous observons que les pourcentages de femmes en postdoctorat restent plus grands que le taux de femmes postulant aux concours.

L'évaluation constante des chercheur.e.s pendant leur carrière et la compétition pour les promotions jusqu'à la retraite ajoutent des barrières et des leviers de discrimination additionnelles pour tou.te.s les chercheur.e.s impliqué.e.s dans la vie familiale.

Financements sur projet – La politique générale mise en place depuis quelques décennies privilégie de plus en plus les financements sur projet, notamment à travers l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le *European Research Council* (ERC) pour les sciences fondamentales. Concernant les demandes ERC, les sommes d'argent en jeu sont très importantes voire *disproportionnées*. L'évolution vers ce type de financement rend le paysage financier de la communauté très déséquilibré. En ce sens, l'ANR représente *l'instrument de financement naturel* pour une grande fraction de la communauté. Malheureusement, on doit déplorer un taux de réussite devenu extrêmement bas, décourageant les chercheurs, et ce en particulier pour les appels blancs. Étant donné ce faible taux de succès, la lourdeur du processus ANR – comparable voire supérieure à une demande ERC – rend cette catégorie de demande doublement difficile.

Il est également important de souligner que, dans la plupart des cas, la recherche en physique théorique n'est pas adaptée à des financements issus de sources privées ou du "Crédit Impôt Recherche". On note des exceptions comme par exemple certaines activités de technologies quantiques ou les études des systèmes complexes, mais la majeure partie des thèmes de recherche afférents à la section de physique théorique ne peuvent pas être financés autrement que sur fonds publics.

Critères bibliométriques – Que ces critères jouent un rôle de plus en plus important est une évidence. Même si la section reconnaît ces critères comme *un des multiples aspects* de l'évaluation scientifique, elle est convaincue que l'évaluation scientifique est un processus bien plus complexe.

Émergence des grandes structures – La section constate la tendance à la fusion entre organismes de recherche et constate tout par-

ticulièrement les difficultés rencontrées par des laboratoires qui se rattachent à des instituts autres que l'INP.

Excellence interdisciplinaire – Nombreuses sont les interfaces (voir 1.3) grâce au périmètre très large de notre section. Néanmoins les recrutements à l'interface sont rendus compliqués puisque nous sommes confrontés à la nécessité de renforcer les disciplines classiques avec un faible nombre de postes à disposition.

3. Évolution de l'organisation et des pratiques de la recherche

Financements sur projet – L'évolution de la politique et la dotation des financements par projets est un enjeu majeur pour la recherche en France et pour la section 02 en particulier. L'accès aux financements de montants modestes permettant de financer des projets naissants sur des durées de temps courtes est la clef de notre mode de fonctionnement. Le maintien des financements récurrents nous semble essentiel à cet égard, de même qu'un processus d'appel à projets à budgets plus faibles suivant un format simplifié et dynamique et, surtout, avec un taux de réussite compatible avec la production scientifique de notre communauté. Nous constatons que la présence d'un ERC peut avoir des conséquences positives pour la communauté ou le laboratoire du lauréat, mais une augmentation de l'importance relative de ce type de financement au détriment d'autres sources à des conséquences négatives très importantes, discutées dans la Sec. 2.

Fonctionnement du Comité National – L'accroissement récent, de 4 à 5 ans, de la durée du mandat du CN est un frein au bon fonctionnement de la commission et risque de nuire à notre communauté. D'abord, une durée

de 5 ans n'encourage certainement pas à un tel engagement les chercheur.e.s en évolution de carrière, notamment celles et ceux proches d'une promotion. De plus, une telle durée crée presque inévitablement l'installation de certains biais, dus par exemple à la composition spécifique de la commission. Ces facteurs nuisent à la représentativité et au dynamisme de notre commission, notamment par rapport aux thématiques émergentes. *Nous préconisons donc un retour à une durée de 4 ans*, comme c'est le cas pour le CNU.

Pression bureaucratique – La bureaucratie ressentie par les chercheurs prend une place qui augmente de plus en plus, au point de devenir souvent prépondérante. Cette évolution, constante depuis longtemps, est nuisible à la recherche en général, et à celle de la section 02 en particulier.

Recherche et changements climatiques – Dans cette ère de prise de conscience des changements climatiques et des multiplications de catastrophes environnementales, l'heure est venue d'agir sur notre mode de fonctionnement. Nous avons toutes et tous un devoir de mettre en cause nos déplacements en avion et voiture et de privilégier le télétravail et les conférences virtuelles. Très rapidement la société développera un regard critique sur notre activité et exemplarité à cet égard. L'avenir environnemental dépendra d'une prise de conscience collective évidemment, mais fort pro-

bablement le financement de la recherche par des sources publiques en dépendra également.

4. Conclusion

Dans ce monde moderne, la vie, les conditions de travail des chercheur.e.s et même l'activité de recherche dans son ensemble sont mis constamment sous pression et nous avons relevé certains points à cet égard. Mais chercheur.e.s reste un métier de vocation et de passion, un fait qui est incontournable et qui, nous espérons ressort joyeusement des pages de ce rapport. C'est donc au moment de conclure que nous voudrions rendre hommage à tous les chercheurs et enseignant-chercheurs de notre communauté dont les résultats et projets ont nourri ce rapport ainsi qu'aux ITA pour le rôle crucial qu'ils jouent au sein de nos laboratoires. C'est le moment de rappeler qu'au cœur des découvertes et des innovations il y a des femmes et des hommes de talent qui ont dédié leur vie à la recherche, à l'amélioration du savoir, à sa transmission et à sa diffusion. Nous partageons cette passion et ce plaisir de faire la recherche fondamentale et c'est un honneur pour nous de représenter celles et ceux qui font partie de la section 02 du CNRS.

SECTION 03

MATIÈRE CONDENSÉE : STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES

Composition de la section

Isabelle BERBEZIER (présidente de section), Vincent JACQUES (secrétaire scientifique), Mauro ANTEZZA, Rafik BALLOU, Véronique BROUET, Sébastien BURDIN, Cyril CHACON-CARILLO, Vincent CROS, Stéphanie GARAUDEE, Olivier KLEIN, Luc LE GRATIET, Aristide LEMAITRE, Marie-Bernadette LEPETIT, Thierry MELIN, Christine MOTTET, Luca PERFETTI, Frédéric PIECHON, Emmanuel ROUSSEAU, Alain SACUTO, Nathalie VIART, Valia VOLIOTIS.

Introduction

Durant cette mandature, la section 3 s'est attachée dans son ensemble à étudier les relations entre la structure et les propriétés électronique de la matière, qui sont devenues de plus en plus intriquées avec la diminution des tailles des objets étudiés. Les chercheurs ont concentré leurs efforts sur un approfondissement de leur compréhension des phénomènes multiéchelles et pour des systèmes de plus en plus complexes et de mieux en mieux contrôlés. Les matériaux synthétisés et étudiés possèdent des fonctionnalités multiples et s'ouvrent à des applications transdisciplinaires à l'interface avec la microélectronique, l'optique, l'intelligence artificielle, l'information quantique, l'énergie, le biomédical, etc. Par ailleurs de

nombreux chercheurs développent une instrumentation de pointe permettant d'accéder à des nouvelles échelles de temps, température, vibrations et de résolution et aux couplages entre phonons, spin, vibrations optiques et mécaniques.

Les grands axes thématiques : Magnétisme et électronique de spin ; Physique Mésoscopique et champ proche ; Semi-conducteurs, et Systèmes corrélés, sont restés inchangés, mais des domaines entiers se sont développés en particulier en physique topologique avec un grand nombre d'équipes qui se sont tournées en particulier vers l'étude des matériaux 2D et l'élaboration de structures hybrides complexes impliquant des mécanismes couplés.

Les différentes nouveautés font intervenir les particules uniques, les effets topologiques, les combinaisons d'ordres quantiques, des

couplages à différents degrés de liberté créant des phénomènes de plus en plus complexes liés au rôle accru des interfaces et des défauts (ex., phénomènes d'intrication entre degrés de liberté vibrationnel et optique, couplage onde lumineuse et polarisation électrique, etc.). La théorie et la modélisation ont aussi particulièrement évolué avec une orientation marquée vers le développement de nouveaux concepts et méthodes numériques issus d'autres domaines scientifiques comme l'information quantique, la chimie quantique et plus récemment le machine learning et s'appliquant à des systèmes et phénomènes génériques.

Par ailleurs, l'activité des chercheurs est de plus en plus dépendante des grandes infrastructures de recherche et des plateformes de nanotechnologie permettant la nanofabrication, le contrôle et l'analyse à l'échelle atomique des systèmes réalisés. La synthèse des systèmes étant mal valorisée à l'échelle nationale, la section 3 est en train de perdre son savoir faire dans ce domaine. Par ailleurs, faute de moyens, de nombreux secteurs de la matière condensée perdent aussi leur avance (matériaux quantiques par exemple). La section 3 généralement tournée vers les études fondamentales a vu une progression importante des recherches ayant un spectre large, du fondamental jusqu'aux applications (avec la création de starts-up).

Nous avons choisi de diviser le rapport en cinq thématiques principales : Magnétisme et électronique de spin ; Physique Mésoscopique et champ proche ; Semi-conducteurs, Matériaux 2D et Systèmes corrélés. Sont ajoutées deux thématiques transversales : la théorie et la modélisation et les infrastructures de recherche incluant les grands instruments et les centrales de nanotechnologie. Les thématiques sont séparées de façon plus ou moins arbitraire, car les parois entre ces domaines sont de plus en plus perméables et un grand nombre d'études combinent les différentes thématiques pour créer de nouvelles approches hybrides ; les nombreuses interactions entre les différents domaines permettent aussi une meilleure compréhension des phénomènes et de la résolution des problèmes multiéchelles.

I. Magnétisme et électronique de spin

En magnétisme et électronique de spin, l'ingénierie des propriétés d'interfaces et/ou l'élaboration de nouvelles hétérostructures ont récemment été au centre de nombreuses recherches dans le but de générer de nouveaux effets physiques. Ces développements ont également permis d'étudier le couplage du spin à d'autres degrés de liberté et d'exploiter ces couplages pour créer de nouvelles fonctionnalités dans des domaines d'applications plus ouverts vers l'interdisciplinarité. Ces progrès au niveau des matériaux ont été obtenus de pair avec le développement de nouveaux moyens expérimentaux de laboratoire permettant soit la caractérisation locale de l'hétérogénéité magnétique (microscopie à centre NV, détection de la résonance magnétique par des techniques de champ proche ou des circuits quantiques, holographie TEM), soit l'observation grand champ de nouvelles textures (microscopie par diffusion de Brillouin, détection de 2nd harmonique) ou sur grands instruments (dichroïsme circulaire sur synchrotrons et diffusion de neutrons). Ces efforts expérimentaux sont en parallèle soutenus par des progrès théoriques à la fois à travers les méthodes de calcul ab-initio ou les codes de simulations micromagnétiques par la parallélisation massive des algorithmes.

A. Nouveaux Matériaux et Ingénierie des interfaces

D'importants progrès ont pu être réalisés récemment en électronique de spin par l'exploration et l'optimisation des possibilités offertes par les matériaux, via des processus d'ingénierie de croissance. Les fonctions de contrôle de l'aimantation et de ses anisotropies, de stabilisation de textures de spins non-colinéaires, de polarisation en spin et de

conversion charge/spin sont les principaux défis relevés. Dans les moyens utilisés, on note une importante montée en puissance de la mise à profit des phénomènes d'interface et l'exploitation des protections topologiques.

Les alliages de Heusler, étant à l'état massif des demi-métaux et présentant de très faibles coefficients d'amortissement, constituent une famille de matériaux d'intérêt en magnétisme et spintronique. La maîtrise de leur croissance en films minces par épitaxie par jet moléculaire a permis d'obtenir des coefficients d'amortissement aussi bas que 7×10^{-4} pour des alliages de $\text{Co}_{3-x}\text{Mn}_x\text{Si}$ avec une polarisation en spin au niveau de Fermi proche de 100%.

Les oxydes, grâce à leurs nombreux degrés de liberté (réseau, charge, spin, orbitale), offrent également un grand potentiel en magnétisme et spintronique. Parmi les plus intéressants, les oxydes ferrimagnétiques, bien évidemment, mais aussi les oxydes ferroélectriques pour la réalisation de jonctions tunnel ferroélectriques, les oxydes magnéto-électriques pour le contrôle à faible coût énergétique de l'aimantation par champ électrique, ou encore des hétérostructures d'oxydes présentant de nouvelles propriétés à leurs interfaces. Si le ferrite de bismuth (BiFeO_3) reste le centre d'intérêt de nombreuses recherches, sous-tendues par sa multiferroïcité à température ambiante, on voit renaître un engouement croissant pour les nickelates ou hexaferrites, matériaux fortement corrélés, donc de propriétés modulables, dont on pourra mettre à profit les interconnexions spin-charge. Les grenats d'yttrium fer, dopés ou non au bismuth ($\text{Y}_5\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -YIG- et $\text{Bi}_x\text{Y}_{1-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -Bi-YIG-) sont eux utilisés pour le contrôle ultra rapide de l'aimantation, sous impulsion laser ou acoustique ; ils sont actuellement les matériaux présentant les plus faibles coefficients d'amortissement de Gilbert (de l'ordre de quelques 10^{-4}). Ils peuvent aujourd'hui être produits sous forme de films ultraminces, et donc être structurés par les techniques standards de lithographie. Prédites par des études théoriques, de nouvelles propriétés ont pu être créées aux interfaces d'oxydes, comme par exemple de la ferroélectricité entre deux cou-

ches d'oxydes non ferroélectriques (ferro-électricité hybride impropre) ou encore un gaz d'électrons bidimensionnels entre deux oxydes non conducteurs (e.g. $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$), avec des caractéristiques de conversion charge-spin très intéressantes en spin-orbitronique.

Les états de surface d'isolants topologiques sont aussi prometteurs pour l'optimisation et le contrôle de la conversion spin-charge. Cependant ils doivent être inclus dans des systèmes hybrides comprenant également un film magnétique. Ces interfaces sont extrêmement délicates et la présence de défauts magnétiques peut facilement affecter les états de surface. Là encore, d'importantes recherches d'ingénierie des interfaces sont nécessaires ; l'intercalation de couches ultraminces non magnétiques est une solution possible.

Les matériaux 2D tels que le graphène ou le h-BN sont très efficaces pour le filtrage de spin dans les jonctions tunnel. Les méthodes classiques d'exfoliation et transfert ne conduisant pas à des résultats satisfaisants, des progrès considérables ont été effectués grâce aux techniques de croissance telles que CVD ou ALD. On assiste actuellement à une extension vers d'autres matériaux 2D, tels que MoS_2 ou le phosphore noir. On mentionnera également l'intérêt fort pour les recherches sur des 2D magnétiques, comme par exemple le semi-conducteur CrI_3 pour le contrôle électrique des propriétés magnétiques, ou encore le Fe_3GeTe métallique pour la spintronique van der Waals.

Enfin, une autre approche poursuivie à la fois expérimentalement et théoriquement concerne la maîtrise des interfaces métal ferro-magnétique / molécules, ou spinterfaces, visant à exploiter l'hybridation dépendante du spin des molécules. Elles requièrent une maîtrise des interfaces entre matériaux de classes différentes, préservant les surfaces métalliques de l'oxydation et les molécules de la dégradation.

B. Couplage à d'autres degrés de liberté

Au cours des dernières années, de nombreuses recherches ont été engagées pour trouver des moyens efficaces de contrôler la dynamique d'aimantation et/ou de se coupler aux excitations de spin. Classiquement ce couplage se fait de manière inductive, via une antenne, et ne permet de se coupler qu'aux ondes de spin de très faibles énergies, de plusieurs ordres de grandeur inférieures à celles des magnons thermiques. De plus, le processus est inefficace pour détecter les ondes de spin dans les films minces, en raison d'une trop faible sensibilité ou d'une incapacité à induire une excitation de grande puissance.

Le développement de sources lumineuses ultra-rapides a permis de générer et détecter de la dynamique d'aimantation dans des films ferromagnétiques, ferrimagnétiques ou antiferromagnétiques. Ce contrôle est obtenu à l'aide de lasers femtosecondes en géométrie pompe-sonde, à travers différentes interactions. La génération d'ondes de choc ultra-rapides peut créer une excitation magnétique, soit directement à l'intérieur du matériau étudié, soit via une fine couche de matériau de transduction. On mentionnera également l'injection de courants de spin par démagnétisation ultra-rapide (effet Faraday inverse). Enfin, des ondes de spin THz peuvent aussi être créées par un changement ultra rapide d'anisotropie photo-induit.

Dans les matériaux multiferroïques, le couplage entre les différents ordres permet d'envisager une manipulation magnétique de la ferroélectricité ou, inversement, une commande électrique du paramètre d'ordre magnétique et/ou d'ondes de spin.

La possibilité de déclencher des excitations collectives à l'aide de transducteurs piézo-électriques interdigués, en utilisant le couplage magnéto-élastique, constitue un moyen alternatif de détecter les ondes de spin. Il existe également des démonstrations de pompage de spin utilisant des ondes acoustiques

comme sources de courant de spin accordables électriquement.

Au-delà des effets de transfert de spin connus dans des dispositifs tels que des vannes de spin ou des jonctions tunnel pour commuter l'aimantation dans une nanostructure ou générer des oscillations entretenues de l'aimantation, de nombreuses recherches concernent le couplage spin-orbite, dans le but de s'affranchir d'une couche magnétique pour générer les courants de spin et créer des couples pouvant agir sur une aimantation. Des couples spin-orbite peuvent être obtenus dans des systèmes hybrides métal ferromagnétique/métal lourd, grâce à des interfaces Rashba, ou encore via les états de surface d'isolants topologiques. De manière réciproque, ces structures hybrides peuvent être utilisées pour détecter la génération de purs courants de spin (et leur transfert au travers d'une interface) par leur conversion en courants de charge, ces effets étant appelés effet Hall inverse ou Edelstein inverse. Un avantage important de ces effets de transfert « spin-orbite » est qu'ils ne sont pas circonscrits aux métaux magnétiques mais se trouvent aussi dans les isolants magnétiques. Ces développements offrent des opportunités uniques de sonder les états hors équilibre, dans lesquels de nouveaux comportements collectifs devraient émerger. On peut citer le contrôle électrique de l'amortissement magnétique dans des films ultraminces de YIG, la dynamique d'ondes de spin dans le régime fortement non linéaire ou encore la condensation de Bose-Einstein de magnons à température ambiante. Ces effets de conversion charge-spin par couplage spin-orbite permettent également l'étude de la génération, la propagation et la détection d'ondes de spin dans des matériaux antiferromagnétiques (métalliques ou isolants), un domaine en forte croissance appelé spintronique antiferromagnétique.

C. Nouvelles opportunités et interdisciplinarité

Un marqueur important de cette thématique est le lien fort entre découvertes fondamentales et recherches applicatives. Dans le domaine des capteurs magnétiques par exemple, une nouvelle génération de capteurs à base de jonctions tunnel, s'appuyant sur des progrès en matériaux, permet d'envisager des implantations dans les nouvelles générations de téléphonie, dans le secteur automobile ou encore dans l'industrie 4.0 avec des capteurs de courant et de puissance, et les codeurs linéaire et angulaire. De plus, de nouvelles applications émergent dans les domaines très prometteurs de l'internet des objets (IoT) et du biomédical avec le développement de dispositifs fiables à très faible consommation d'énergie sur silicium, sur des substrats souples ou encore en s'appuyant sur la fonctionnalisation de surfaces ou de nanoparticules.

Les mémoires magnétiques basées sur les effets de transfert de spin (STT-MRAM) sont désormais disponibles sur le marché, avec l'ambition de les voir remplacer à court terme les dispositifs à base de semi-conducteurs. Des alternatives de dispositifs de mémoire spintronique font encore l'objet de recherches actives, avec par exemple, les systèmes de registre à décalage basés sur la création, la manipulation et la détection de solitons magnétiques (e.g. parois magnétiques chirales ou textures de spin topologiques comme les skyrmions magnétiques).

La spintronique s'est récemment ouverte à d'autres disciplines dans le but d'améliorer les performances des dispositifs spintroniques et surtout d'apporter de nouvelles fonctionnalités à l'interface avec la biologie, le transport moléculaire ou l'optique. De nouvelles applications de la spintronique se tournent vers les thématiques bio-inspirées, comme le calcul neuromorphique et l'apprentissage automatique. On peut citer aussi les récents développements visant l'intégration de molécules fonctionnelles actives telles que des molécules

photochromes, électrochromes ou redox pour parvenir à moduler les propriétés des jonctions par des stimuli lumineux ou par un champ électrique. Enfin, à l'interface avec l'optique, des résultats importants ont été obtenus sur les systèmes spin LEDs qui ont permis de montrer des conversions spins-photons très efficaces dans le visible, avec en perspective une commande électrique de la polarisation de la lumière émise. Au-delà de la gamme du visible, des développements très prometteurs vers des dispositifs spintroniques THz sont envisagés grâce aux effets de conversion spin-charge sous impulsions laser.

La magnonique s'est développée ces dernières années en exploitant les synergies entre la physique de la dynamique d'ondes de spin, les effets de couples de transfert de spin et la spin-orbitronique comme moyen de générer, contrôler et traiter l'information dans le domaine fréquentiel du GHz au THz. La proximité, en termes de concepts, avec les domaines de la photonique intégrée, de la plasmonique et de la phononique permet de proposer des applications concrètes pour le traitement de l'information (beyond CMOS) ou pour le traitement du signal analogique.

Un défi pour la spintronique est de pouvoir apporter des solutions de technologies propres et peu énergivores. Dans ce sens, une approche se concentre autour des effets de caloritronique de spin qui regroupe les études liées aux interactions entre des courants de spin et des courants de chaleur, pour améliorer drastiquement les dispositifs thermoélectriques existants. Une autre voie prometteuse concerne le couplage de nano oscillateurs spintroniques en réseaux afin de réaliser des dispositifs RF ou des algorithmes d'apprentissage neuroinspirés (e.g. reconnaissance de formes ou de voix) à coût énergétique plus bas que des ordinateurs conventionnels. D'autres approches pour le développement de méthodes de calculs innovantes se basent sur les propriétés statiques et dynamiques de réseaux de glaces de spin artificielles ou encore sur la dynamique magnétique en régime chaotique dans des nano-dispositifs.

II. Physique Mésoscopique et champ proche

A. Introduction

Dans les dispositifs électroniques suffisamment petits et à suffisamment basse température, les électrons ne se comportent plus comme des charges ponctuelles mais comme des paquets d'ondes quantiques dont les phases peuvent interférer. La physique mésoscopique s'attache à révéler, comprendre et contrôler les phénomènes d'interférences de phase et de décohérence intervenant dans de tels dispositifs électroniques.

Depuis les premières mesures emblématiques des fluctuations universelles de conductance et des corrections de localisation faible dans des conducteurs désordonnés, les plateformes expérimentales et les champs d'investigation de la physique mésoscopique se sont multipliés.

Un premier axe concerne les systèmes de dimensions réduites avec entre autres les états de bord d'effet Hall quantique et les boîtes quantiques. Une problématique centrale reste la mise en évidence et le contrôle des effets des interactions électrons-électrons, de l'environnement électromagnétique ou d'autres degrés de liberté sur le transport quantique. Les développements récents vont vers le transport à haute fréquence et «l'optique quantique» de l'électron unique.

Un second axe concerne les systèmes supraconducteurs et/ou hybrides. En particulier les perspectives de mise en évidence d'excitations de type Fermions de Majorana et de supraconductivité exotique ont généré une activité croissante sur les effets du couplage spin orbite, des impuretés et des textures magnétiques.

Un troisième axe d'importance toujours croissante concerne les matériaux dit topo-

logiques (isolants et/ou semimétaux) et les hétérostructures Van-der-Waals de matériaux 2D. Pour les premiers, l'engouement vient de la perspective d'obtenir des états de bords chiraux et donc des effets de cohérence de phases «robustes». Pour les seconds, l'intérêt vient notamment des multiples transitions de phases quantiques observées très récemment dans les Moirés de multicouches de graphène.

Un dernier axe concerne les circuits/architectures quantiques complexes telles que les Qbits, réseaux de jonctions Josephson, etc. Les enjeux sont très divers; il s'agit d'une part de problématiques d'information, détection ou simulation quantiques avec comme perspectives l'ordinateur quantique, et d'autre part de réaliser des nouveaux détecteurs ultrasensibles (de champs magnétiques, température, photons, etc.) destinés soit à des expériences de laboratoires soit à l'astrophysique spatiale.

B. Systèmes de dimension réduite : transport quantique et interactions Coulombiennes

Les mesures de transport électronique dans des systèmes de dimensions réduites, fils (1D) et boîtes (0D) quantiques, ont joué un rôle important dans la validation de concepts clefs de la physique mésoscopique : ex. canal de conduction, résistance de contacts, approche de type Landauer-Buttiker, géométrie multiterminaux, bruit quantique, blocage de coulomb (dynamique ou non) etc.

Il existe deux grandes voies d'élaboration des objets de dimension réduites. La première voie utilise des techniques de nanofabrication pour nanostructurer par exemple un gaz bidimensionnel d'électrons en des géométries multiterminaux variées permettant l'ajustement des contacts (tunnel ou ohmique) aux réservoirs. Le confinement 1D en canaux d'états de bord d'effet Hall quantique est alors obtenu en appliquant un champ magnétique suffisamment fort. La seconde voie concerne les systèmes

moléculaires. Il s'agit aussi bien de molécules uniques (nanotubes de carbone, fullérènes, polymères...), de nanofils semi-conducteurs (InAs, GaAs) ou encore des assemblages moléculaires auto-organisés sur substrat. À l'exception des nanotubes de carbone voire des fullérènes, une problématique importante de ces systèmes moléculaires reste le contrôle des contacts aux électrodes. De façon générale, le couplage aux contacts détermine le degré de confinement et donc le régime de transport et l'importance des effets des interactions Coulombiennes.

L'étude des effets coulombiens dans les fils quantiques se développe principalement au travers de dispositifs utilisant les canaux de bord d'effet Hall quantique entier ou fractionnaire. Des expériences d'interférence ont révélé le rôle des interactions dans la décohérence entre ces canaux. Des mesures de bruit à fréquence finie ont démontré l'existence d'une fréquence de seuil associée à des excitations de charge fractionnaire. Des effets de blocage de Coulomb ont été mis en évidence dans le transport quantique de chaleur. Un circuit quantique réalisant un simulateur analogique de la physique d'une impureté de transmission variable (du régime balistique à tunnel) dans un liquide de Luttinger a permis une comparaison détaillée entre théorie et expérience des comportements d'échelle de la conductance en fonction de la température, de la tension et de la transmission. Les développements récents vont vers le transport à haute fréquence et l'optique quantique de l'électron unique.

Pour les boîtes quantiques, au-delà du phénomène de blocage du courant induit par les interactions, les études récentes se concentrent sur la physique Kondo associée à la formation d'un (pseudo)-moment magnétique local, écrant dynamiquement par les électrons des contacts. Ainsi, il a été possible de mettre en évidence des fluctuations quantiques universelles via des mesures de caractéristiques non linéaires de la conductance et du bruit en courant en fonction de la symétrie $SU(2)$ vs $SU(4)$ dans une boîte quantique réalisée dans un nanotube de carbone. Lorsque ce système est relié à des contacts supraconducteurs une transition de

phase quantique a pu être mise en évidence. Par ailleurs, un dispositif à multiples points de contact quantiques a aussi permis de réaliser un simulateur analogique quantique d'un effet Kondo de charge à 2 et 3 canaux avec notamment des mesures détaillées du comportement d'échelle de la conductance en fonction de la température en accord avec les calculs théoriques, analytiques ou numériques.

C. Supraconductivité mésoscopique et systèmes hybrides

L'étude des supraconducteurs en dimension réduite et des effets de proximité induits par les corrélations supraconductrices dans les systèmes hybrides constitue deux domaines majeurs de la physique mésoscopique.

En ce qui concerne les supraconducteurs en dimension réduite, une question importante reste la compréhension des transitions supraconducteur-isolant dans les films ultraminces et les nanofils. Dans cette perspective, des expériences récentes sur des films supraconducteurs amorphes suggèrent en particulier une transition supraconductrice correspondant à la mise en cohérence de paires de Cooper préformées à plus haute température. Des mesures de transport sur des nanofils ont permis de caractériser les exposants critiques dynamique et spatial de la transition quantique en champ magnétique et température.

Pour les systèmes hybrides, il est possible de caractériser les états d'Andreev de jonction Josephson de tels systèmes. Les sondes sont les spectroscopies tunnel et haute fréquence, ou la relation entre le supercourant et la différence de phase supraconductrice à basse et haute fréquence dans le cas de géométries annulaires. Une autre direction concerne les phénomènes hors-équilibre dans ces jonctions hybrides. Ainsi on peut accéder au temps de diffusion du spin dans des jonctions supraconducteur-ferromagnétique.

Des progrès importants dans les dispositifs de mesure en champ proche permettent maintenant la combinaison de microscopies par effet tunnel et à force atomique à très basse température et en champs magnétiques élevés. De tels dispositifs ont permis entre autre d'étudier en détail la spectroscopie et la structure spatiale des états de Shiba d'impuretés magnétiques isolées ou d'îlots dans des films supraconducteurs. La spectroscopie locale a aussi permis la mise en évidence de vortex induits dans des jonctions Josephson latérales, ou encore de l'apparition d'un réseau de vortex dans un film métallique déposé sur un supraconducteur. Enfin des mesures en champ proche du bruit du courant tunnel d'un film supraconducteur haute-température critique ont été réalisées.

D. Matière topologique : isolants et semi-métaux

Les matériaux présentant des structures de bandes dites « topologiques » (isolants ou semi-métaux) se caractérisent par le fait que l'impulsion des électrons et donc leurs mouvements sont fortement couplés à un ou plusieurs pseudo-spins (spin, vallées, sous-réseau...). Ce couplage pseudo-spin(s)-impulsion est à l'origine de l'existence d'états de surface ou d'interface métalliques chiraux polarisés en pseudo-spins.

Pour les matériaux isolants en volume, l'intérêt principal se porte sur la physique mésoscopique des états chiraux balistiques 1D apparaissant en surface ou aux interfaces : mise en évidence et ingénierie d'effet Hall quantique de spin ou de vallée, étude de la cohérence de phase, couplage à des supraconducteurs (excitations de fermions de Majorana, jonctions Josephson topologiques, effet Ahronov-Bohm...). Les matériaux isolants topologiques bidimensionnels sont principalement obtenus dans des puits quantiques d'hétérostructures semi-conductrices ; HgTe/CdTe et plus récemment InAs/GaSb. Une autre voie consiste à

induire une bande interdite dans un semi-métal topologique soit grâce à un champ électrique transverse à une bicouche de graphène soit en induisant un couplage spin-orbite dans des Moirés d'hétérostructures Van-der-Waals graphène/TMDC. Les composés au Bismuth et plus récemment le Bismuth cristallin se révèlent particulièrement intéressants. Ce dernier système fait partie d'une nouvelle classe d'isolants topologiques, dite d'ordre supérieur avec une conduction uniquement sur les arêtes d'un système tridimensionnel.

Parallèlement aux isolants topologiques, le domaine des semi-métaux topologiques s'est beaucoup développé. D'un côté des expériences de magnéto-transport dans plusieurs familles de composés ont mis en évidence des oscillations quantiques et une magnéto-résistance longitudinale négative caractéristique de l'anomalie chirale attendue pour des semi-métaux de Weyl ou de Dirac 3D. D'autre part des mesures de transport et de microscopie tunnel récentes sur des Moirés de deux couches de graphène tournées ont mis en évidence un angle magique donnant lieu à l'apparition de multiples transitions de phases quantiques en fonction de la densité électronique, du champ magnétique et de la température avec notamment des phases supraconductrices, isolant de Mott, ferromagnétique, effet Hall quantique anormal. Ces expériences ont donné lieu à une grande effervescence de la communauté et les calculs théoriques suggèrent une reconstruction importante de la structure de bande en fonction de l'angle avec en particulier l'apparition d'une bande quasi-plate engendrant de fortes corrélations électroniques à l'angle magique.

E. Circuits quantiques : information, détection et simulation quantiques

Le domaine concernant le contrôle et l'utilisation de l'information quantique est également un des domaines majeurs de la physique méso-

scopique. Les systèmes physiques utilisés pour encoder l'information sont à présent assez divers avec des qubits basés sur des jonctions Josephson, des qubits du spin réalisés dans des boîtes quantiques, des nanofils semiconducteurs ou des défauts dans des systèmes solides cristallins. Parmi les enjeux actuels on peut citer la réalisation sur un même échantillon d'un grand nombre de qubits couplés et l'obtention d'un couplage fort entre un ou des qubits avec des photons ou des phonons. Dans le domaine micro-onde, pour atteindre le régime de couplage fort, de nouveaux matériaux, basés sur des réseaux de jonctions Josephson ou des matériaux à très haute inductance cinétique, ont été développés pour réaliser des super-inductances ou des environnements à forte impédance caractéristique. Ceci permet de manipuler les états de photons dans la cavité couplée au qubit, d'intriquer fortement l'état de ce qubit avec le champ de photons ainsi que réaliser des états non-classiques du champ électromagnétique.

Plus généralement augmenter le couplage du champ électromagnétique avec des systèmes classiques de la physique mésoscopique tels que la jonction Josephson ou la jonction tunnel ouvre la possibilité de réaliser ou détecter des états non classiques de photons et d'étendre la détection à d'autres domaines de fréquence tel que l'optique. Les jonctions Josephson sont l'ingrédient de base d'amplificateurs micro-onde dont les performances se rapprochent de la limite quantique, et sont également utilisées comme spectromètres ou détecteurs de photons intégrés sur échantillon dans un régime de fréquence difficilement atteignable par d'autres moyens.

Une autre direction prise dans le domaine de l'information quantique concerne la réalisation de simulateurs quantiques.

F. Instrumentation champ proche

Les microscopies de champ proche permettent une étude locale et/ou une cartographie des propriétés opto-électroniques à l'échelle nanométrique aussi bien sur des objets individuels (atomes, molécules, boîtes ou fils quantiques...) que sur des objets étendus comme les matériaux 2D.

Elles incluent la spectroscopie tunnel pour la microscopie à effet tunnel, la spectroscopie à sonde de Kelvin pour la microscopie à force atomique, ou encore la microscopie à balayage de grille. Au-delà de ces usages traditionnels, ces techniques sont actuellement développées d'un point de vue instrumental en couplage avec des techniques temporelles ou fréquentielles (de nature électrique ou optique), et usuellement implémentées en environnement basse température et/ou ultra-vide en ce qui concerne les applications en physique mésoscopique. Ainsi, par exemple, des excitations électriques ou optiques modulées ou des instrumentations pompe-sonde peuvent être utilisées pour mesurer les propriétés de nanomatériaux pour le photovoltaïque dans des gammes temporelles sub-microseconde, ou pour étudier des phénomènes de relaxation à l'échelle de la nanoseconde. Le développement de la spectroscopie tunnel ultra-vide et basse température à haute fréquence (\sim MHz) permet d'isoler et d'imager le bruit de grenaille dans des jonctions tunnel locales (et donc la charge locale transportée), avec des applications pour l'imagerie de supraconducteurs. L'utilisation d'excitations radiofréquence (de l'ordre du GHz) sur la pointe d'un microscope à effet tunnel peut être utilisée pour sonder les nanomatériaux magnétiques. La microscopie à force atomique peut être utilisée comme sonde locale pour réaliser des mesures micro-onde sur des nanodispositifs tels que des jonctions moléculaires (scanning microwave microscopy), ou des mesures de nanomatériaux dans la gamme THz (scattering scanning near-field optical microscopy).

III. Semiconducteurs

Les semiconducteurs et leurs hétérostructures sont toujours des objets d'étude prisés de la communauté de la matière condensée, tant pour leurs propriétés électroniques qu'optiques. Les progrès en élaboration, en caractérisation et nano-fabrication donnent accès à une grande diversité de matériaux et de structures pour explorer de nombreux phénomènes comme le couplage lumière-matière, le transport à l'échelle mésoscopique, les effets de spin ou encore l'opto-mécanique.

A. Matériaux : élaboration, analyses structurales et nano-structuration

Parmi les nombreux types de semiconducteurs, les composés IV-IV, III-V, III-N, et II-VI sont certainement les plus étudiés. L'élaboration des matériaux massifs et de leurs hétérostructures est en constant progrès au niveau de leur qualité cristalline, de leur pureté et de la complexité des empilements. Les techniques les plus courantes pour la croissance des hétérostructures sont les épitaxies par jets moléculaires et en phase vapeur. La disponibilité des substrats, accordés en paramètre de maille, est un point crucial pour épitaxier des structures de qualité. Pour certains matériaux comme les composés III-N qui ne disposent pas de substrats adaptés, différentes approches ont été développées, notamment par nano-structuration des substrats, qui donnent de très bons résultats. Ces efforts portent aussi sur l'hybridation entre différentes familles de matériaux, comme les III-V et le silicium, les III-V et les oxydes, motivée par les applications opto-électroniques. Un domaine a émergé ces dernières années autour de l'élaboration de composés dits « isolants topologiques ». Les propositions théoriques de nouveaux composés sont nombreuses mais peu

encore ont été démontrées expérimentalement. Les études sur les composés pérovskites connaissent aussi un engouement important, domaine tiré par les applications photovoltaïques.

Les études théoriques et expérimentales sur la croissance des nano-objets sont très actives. La compréhension des mécanismes de croissance a fait de considérables progrès notamment autour des nanostructures auto-organisées comme les boîtes quantiques et les nanofils. Ces nanostructures peuvent être aussi réalisées par synthèse colloïdale sous forme de nano-cristaux ou nano-plaquettes. Les récents développements ont permis d'obtenir, pour ces dernières, une émission de photoluminescence stable. Ces dernières années ont vu, à la suite de la découverte du graphène, de nombreuses avancées sur la croissance des matériaux 2D. Il est maintenant possible de réaliser des hétérostructures à partir de ces feuillets, avec des désorientations contrôlées entre couches pour explorer de nouvelles propriétés, comme la supraconductivité.

Les derniers développements des outils d'analyse permettent d'accéder à la structure cristalline à l'échelle quasi atomique. Il s'agit notamment du microscope électronique en transmission corrigé des ultimes aberrations géométriques, qui permet d'observer *in situ* et en temps réel, la croissance de nano-objets avec une résolution nanométrique. De nombreux développements instrumentaux sont en cours dans le but de réaliser des équipements couplant différents types d'analyses sur des zones nanométriques, en particulier des cartographies 3D couplant analyse chimique par spectroscopie d'ions secondaires et imagerie topographique par microscopie électronique.

Les progrès dans les techniques de fabrication permettent la structuration de la surface à l'échelle de la dizaine du nanomètre (lithographie électronique, gravure ionique, nano-impression, fonctionnalisation locale). Ces développements offrent de nouvelles voies pour le confinement des électrons, phonons et photons dans les trois dimensions.

B. Couplage lumière-matière

L'avènement des technologies quantiques et la quête de systèmes solides robustes et intégrables dans des dispositifs couvrant une large gamme de longueurs d'onde, de l'UV à l'infrarouge amplifie les recherches sur les nanostructures de semiconducteurs. Une grande partie des travaux se concentre sur leur intégration dans des résonateurs optiques fabriqués à partir de matériaux diélectriques ou métalliques afin d'étudier les différents régimes du couplage lumière-matière.

Les boîtes quantiques (BQ) de semiconducteurs figurent actuellement parmi les systèmes à l'état solide les plus matures notamment pour d'éventuelles applications en information quantique basées sur les principes d'intrication ou de téléportation. Leur spectre d'énergie discret permet de définir des bits quantiques, que l'on peut manipuler de manière cohérente à l'aide de faisceaux lumineux résonnants. Les états de spin d'un porteur de charge unique, définissent quant à eux un qubit avantageux, grâce à l'initialisation possible de l'état. Néanmoins les problèmes de couplage avec la matrice cristalline environnante limitent le temps de cohérence des états quantiques. Cela a conduit à de nombreuses études sur les interactions avec les phonons, le spin nucléaire des atomes de la matrice et l'environnement électrostatique fluctuant au voisinage des BQ. L'intégration maîtrisée des BQ dans différents types de cavités photoniques (nanoguides d'ondes, miroirs de Bragg planaires, micropiliers, cristaux photoniques...) a permis de démontrer par exemple, l'émission de photons uniques à la demande avec une très grande efficacité et un degré d'indiscernabilité proche de l'unité.

Les défauts ponctuels, tels que les centres NV dans le diamant ou SiC et les centres G dans le silicium, constituent des sources de photons uniques, avec des applications possibles dans les longueurs d'onde telecom et des sondes ultra-sensibles de champ magnétique.

Le spin électronique dans une matrice de silicium, constitue également un système prometteur suscitant un intérêt croissant vu la compatibilité du matériau avec les dispositifs CMOS. La manipulation et le transport du spin sont réalisés avec succès, mettant en évidence des temps de cohérence très longs, concurrençant ainsi les qubits supraconducteurs.

Les pérovskites semiconducteurs sont très fortement étudiés, notamment en raison de leur fort potentiel pour les applications en photovoltaïque. Leurs propriétés électroniques ne sont pas encore totalement maîtrisées et les systèmes perovskites de basses dimensions (perovskites bi-dimensionnels, nanoplatelets, nanocristaux colloïdaux...) constituent un vaste champ d'études de spectroscopie optique et magnéto-optique.

Les hétérostructures de semiconducteurs à excitons indirects ayant un large moment dipolaire et des temps de vie très longs, ont fait l'objet d'études importantes aussi bien théoriques qu'expérimentales, car ils constituent un système de choix pour étudier des phénomènes liés à la condensation de Bose. La génération de condensats dits « gris » faiblement couplés à la lumière a été mise en évidence, avec les signatures caractéristiques de cohérence spatiale, de transition de phase superfluide à deux dimensions dans la limite de fortes interactions entre particules.

L'engouement pour les matériaux 2D, concerne principalement le nitrure de Bore hexagonal, le phosphore noir, les dichalcogénures de métaux de transition et le silicène/germanène. À la différence du graphène, ces matériaux sont des semi-conducteurs qui présentent des effets de basse dimensionnalité avec des conséquences sur les propriétés vibrationnelles, diélectriques et excitoniques du fait de leur géométrie 2D. Ceci a ouvert la voie pour revisiter entre autres la physique des excitons dans les SC.

Les cavités semi-conductrices notamment à base de GaAs et plus récemment de ZnO, qui présentent un régime de couplage fort lumière-matière, permettent d'explorer la physique très riche des polaritons, quasi-particules mixtes

exciton-photon. Elles sont un système modèle pour l'étude des fluides quantiques et des condensats de Bose en présence de dissipation. Leurs interactions donnent lieu à de nombreux effets non linéaires comme la superfluidité, la nucleation de vortex, ou encore la bistabilité optique. Les recherches s'orientent d'une part vers le développement d'une circuiterie polaritonique à l'ambiante, mais aussi vers l'ingénierie des polaritons pour la simulation quantique.

La qualité cristalline des semiconducteurs en fait un terrain de jeu idéal pour étudier la propagation et le confinement des phonons, notamment dans des structures de taille nanométriques. Le couplage lumière-phonon est très efficace pour observer, générer et contrôler les ondes acoustiques. Ces ondes peuvent être générées jusque dans la gamme du THz et se propager sur des dizaines de micromètres. Elles peuvent être piégées dans des cavités ou même des cristaux phononiques de taille submicrométrique, à la frontière avec le régime mésoscopique.

C. Propriétés électroniques : courant de charge et de spin

L'électronique repose au premier plan sur le silicium qui poursuit une pente ascendante en raison de ses propriétés toujours améliorées grâce à de nouvelles réalisations (contrainte, ultra-haut dopage, transformation de phase, configuration 2D). Mais les autres familles de matériaux tirent aussi leur épingle du jeu comme le système GaAs/AlAs avec les gaz d'électrons bidimensionnels de très haute mobilité pour la physique mésoscopique et les composants électroniques hautes fréquences / bas bruit, ou les nitrures pour les transistors de puissance.

Les semiconducteurs contribuent au développement de la physique du spin, de la spintronique et de ses dérivés comme la spin-orbitronique ou la valleytronique. Il s'agit notamment d'étudier la génération de courants

de porteurs polarisés en spin et leur détection. Les récentes avancées portent sur les matériaux à fort couplage spin-orbite, présentant des effets Rashba importants, et les isolants topologiques. Le magnétisme est présent chez les semiconducteurs magnétiques dilués qui peuvent présenter une phase ferromagnétique. La température de Curie est certes faible, mais ces systèmes restent des composés modèles pour étudier les mécanismes en jeu dans la propagation des domaines, le transfert de couple de spin, le couplage magnéto-strictif...

IV. Systèmes bidimensionnels

La recherche sur les matériaux 2D s'est développée depuis la démonstration de l'exfoliation des feuillets de graphène. Tout en étant le premier matériau bidimensionnel à être isolé, la graphène continue à être la brique de base d'une recherche florissante. Dans le régime balistique, les électrons du graphène se comportent, comme s'ils étaient sans masse, à la manière des photons. En changeant localement le potentiel électrostatique avec des jonctions $p-n$, il est possible de réaliser des éléments similaires à ceux utilisés couramment dans l'optique ondulatoire. De nouvelles fonctionnalités peuvent aussi émerger en pliant les trajectoires électroniques avec un champ magnétique ou en utilisant l'effet tunnel. Dans de nombreux cas, le graphène est employé comme plateforme de systèmes hybrides plus complexes. Un exemple est fourni par une monocouche décorée avec des nanoparticules d'un métal supraconducteur. Contrôlé par une électrode de grille, ce système permet d'étudier en détail les transitions de phase quantiques dans les supraconducteurs bidimensionnels. Plus récemment on a observé l'émergence d'un diagramme de phase très varié lorsque deux couches de graphène sont superposées avec un twist, l'application d'une tension de grille permet de transiter d'une phase conductrice isolante ou à une phase

supraconductrice. Ce phénomène vient de l'apparition d'une bande d'énergie avec une dispersion énergétique très faible. Le rôle des fortes corrélations entre les électrons de cette bande est actuellement débattu.

En dehors du graphène, de nombreuses études se focalisent actuellement sur différents matériaux 2D isolants ou semi-conducteurs. Un des isolants très étudié est le nitrure de Bore hexagonal (h-BN), qui a une structure identique à celle du graphène, mais des propriétés chimiques et électroniques très différentes. Le h-BN présente un éventail de propriétés vibrationnelles, diélectriques et excitoniques nouvelles. Ses propriétés optiques en bord de bande interdite offrent par ailleurs, de nouvelles perspectives d'applications dans l'UV. Il permet aussi un filtrage de spin par effet tunnel efficace.

Le h-BN représente aussi un matériau idéal comme support pour l'encapsulation du graphène et des dichalcogénures. En effet, des dispositifs avec de nouvelles fonctionnalités sont obtenus en construisant des hétérostructures de Van der Waals par empilement de cristaux bidimensionnels. Il a été montré que l'encapsulation de ces structures 2D entre des couches de h-BN offre une protection contre les contaminations. Cette procédure conduit à une forte augmentation de la mobilité des porteurs de charge et du temps de vie du dispositif. Au regard des nombreux résultats prometteurs obtenus, l'ingénierie des hétérostructures de Van der Waals, est aujourd'hui une voie poursuivie par un nombre croissant de groupes français.

Les matériaux semi-conducteurs les plus couramment étudiés sont, le phosphore noir, les dichalcogénures de métaux de transition (TMD) et le silicène/germanène. En étant des semi-conducteurs, ces matériaux procurent une plateforme idéale pour les études d'opto-électronique. En raison de l'écrantage faible du potentiel coulombien, les excitons des TMDs ont une énergie de liaison élevée, ce qui permet l'étude de la physique de la condensation des bosons composites à haute température. En plus, la brisure de symétrie d'inversion du cristal et le fort couplage spin-orbite, don-

nent aux excitons des degrés de liberté internes associés aux vallées dans l'espace réciproque.

Comme dans le cas du graphène, les propriétés électroniques des nouvelles hétérostructures hybrides à base de TMDs dépendent de l'alignement des niveaux électroniques entre les couches supérieure et inférieure des différentes interfaces où il est possible de générer des excitons indirects avec un temps de recombinaison long. Le but étant d'atteindre un état condensé. De plus, ces matériaux transitent entre différentes phases cristallines, ce qui en fait des matériaux intéressants pour les dispositifs memristifs et de stockage d'énergie. De plus, une nouvelle méthode de dopage par couplage anodique, permet de créer une transition supraconductrice dans des TMDs. Cette méthode est conceptuellement similaire au dopage par tension de grille et donc facilement réversible.

La caractérisation microscopique et spectroscopique des couches 2D est aussi une étape essentielle dans ce domaine de recherche. À côté des techniques standard utilisées (microscopie et spectroscopie champ proche, analyses de surface, micro-Raman) les mesures de photoémission résolue en angle à l'échelle nanométrique permettent de compléter ces caractérisations. Ainsi, il est possible d'étudier la dispersion des états électroniques en fonction du nombre de couches, de voir l'effet d'un angle d'empilement sur les états occupés et de déduire l'alignement des bandes dans les hétérostructures. Un rôle de premier plan est joué par les mesures magnéto-optiques des niveaux de Landau dans le graphène et des états excitoniques dans les TMD. Avec l'application d'un champ magnétique il est possible d'exalter la brillance des excitons, de changer la polarisation de vallée et de montrer l'émission d'un photon unique par des défauts intrinsèques.

Enfin, les matériaux 2D sont aussi utilisés comme des résonateurs opto-mécaniques pour des études d'intrication entre degrés de liberté vibrationnel et optique. La masse réduite et le fort couplage dipolaire leur donne une extrême sensibilité aux photons et à la présence de masses adsorbées. Un couplage des monocouches de TMDs avec des structures plasmiques chirales

est aussi envisagé pour contrôler la polarisation des vallées des excitons.

V. Systèmes corrélés

A. Définition

Les systèmes corrélés sont des systèmes où les interactions entre les constituants élémentaires d'un matériau sont si fortes, que le traitement de chaque électron comme une particule individuelle agissant dans un potentiel effectif créé par les autres électrons n'est plus applicable. Les calculs de structure de bandes deviennent obsolètes et les théories perturbatives standards ne sont plus valides. Un exemple emblématique est l'isolant de Mott d'un cuprate (oxyde de cuivre). Sa structure de bande le qualifie de conducteur mais les forces de répulsion coulombienne sur les sites de cuivre sont si fortes que les électrons se figent, le rendant isolant. La particularité des systèmes corrélés est de former à basse température des états quantiques intriqués de telle sorte qu'une très grande diversité de nouveaux états émergent, conduisant à des propriétés physiques en rupture avec tout ce que nous connaissons aujourd'hui. La supraconductivité à haute température (150 K) des cuprates, longtemps inimaginable, en reste l'exemple emblématique.

B. État de l'art et enjeux

Les systèmes fortement corrélés ont un potentiel applicatif très prometteur (photovoltaïque, thermoélectricité, stockage de l'énergie, spintronique et supraconductivité). Par exemple, le contrôle de la transition métal/isolant de Mott par impulsion électrique ou lumineuse

dans les oxydes, possible depuis quelques années seulement, ouvre la porte au développement de nouveaux interrupteurs qui pourraient simuler les fonctions de nos synapses dans le cerveau pour se tourner vers une intelligence artificielle sans carbone. L'enjeu est de développer des outils théoriques et expérimentaux qui permettront d'appréhender toute la complexité des systèmes fortement corrélés. Tout ceci, cependant, ne pourra être réalisé sans un investissement dans la synthèse de matériaux à fortes corrélations, domaine où nous avons pris du retard par rapport aux pays anglo-saxons et asiatiques par manque d'anticiaption et de moyens.

Sur le plan modélisation, de nouveaux outils théoriques et numériques ont été développés. Il y a d'une part, des modèles de type Hamiltonien, pour décrire les transitions de phase des matériaux corrélés et leurs éventuelles brisures de symétrie et d'autre part, des approches de type « premiers principes », pour décrire quantitativement leur structure électronique. Des résultats pionniers ont été obtenus dans ces domaines comme par exemple les méthodes de champ moyen dynamique (DMFT) pour décrire les diagrammes de phase d'oxydes de métaux de transition comme les cuprates, mais aussi, les pnictures et les organiques. Ceci a permis de renforcer les collaborations entre théoriciens et expérimentateurs. D'autres concepts issus de la physique théorique, tels que les symétries émergentes et les théories de jauges sont en plein expansion, notamment pour comprendre la nature des points critiques quantiques rencontrés dans les cuprates, les fermions lourds, les pnictures et les organiques. Des développements théoriques très récents appelés concepts holographiques visent à contenir l'information sur des systèmes de dimensionalités réduites. Ils sont à la frontière entre les systèmes à fortes corrélations électroniques, la théorie des cordes, la physique des trous noirs et la théorie de l'information quantique.

Au niveau expérimental, des progrès spectaculaires ont été réalisés sur les résolutions en énergie, en moment ou en temps de différentes sondes expérimentales (spectroscopies tunnel,

photoémission, Raman, infrarouge, neutron, Rayons X). Les sondes de transport traditionnelles ne sont pas en reste avec leurs développements sous conditions extrêmes : très haut champ, très haute pression, très basse température et l'utilisation de techniques de nanofabrication. De nouveaux types de dopage ont été mis en place comme les liquides ioniques qui n'altèrent pas la composition chimique, ainsi que des façons fines de contrôler leurs paramètres intrinsèques (contraintes uniaxiales, impulsions de courant ou de lumière). De nouvelles opportunités se dessinent à l'horizon où la physique des semi-conducteurs rejoint celle des électrons corrélés. Il s'agit de systèmes 2D comme l'empilement de feuillets de graphène ou de dichalcogénures ou des hétéro-structures, qui révèlent des phénomènes étonnants aux interfaces : supraconductivité, polarisation orbitale, transfert de charge, effet Rashba associé au couplage spin-orbite...

C. Quelques phénomènes emblématiques des systèmes fortement corrélés

Identifier l'origine de la supraconductivité à haute T_c dans les cuprates reste un véritable défi. Quelle interaction, parmi les différents ordres quantiques en compétition ou en coopération dans ces matériaux, prédominera dans la formation des paires de Cooper ? Nul ne le sait, même si les fluctuations de spins jouent sans doute un rôle majeur pour les cuprates, comme pour les supraconducteurs au fer apparus plus récemment, ou encore les fermions lourds et les organiques. La reproduction très récente d'une partie du diagramme de phase des systèmes fortement corrélés, avec notamment un dôme de supraconductivité, dans des feuillets de graphène « twistés » ne fait que renforcer l'attrait de ces questions. La récente découverte de la supraconductivité dans un composé à base de Nickel, dont la structure électronique est proche de celle des cuprates, ouvre la voie à une nouvelle famille de supra-

conducteurs dans lesquels les corrélations électroniques sont importantes. Il y a eu aussi un regain d'intérêt pour la supraconductivité de systèmes alternatifs comme SrTiO_3 ou NbSe_2 , ou pour la supraconductivité induite par un champ magnétique dans des composés de terres rares. D'un autre côté, le record de température supraconductrice (200K) est maintenant détenu par des hydrides sous très forte pression (plus d'une centaine de GPa) avec un mécanisme d'appariement électron-phonon traditionnel, ce qui montre qu'il n'y a pas de limite intrinsèque à la supraconductivité.

Parallèlement, l'intérêt pour les supraconducteurs exotiques s'est élargi à la recherche de supraconducteurs topologiques, dont les états de bord seraient des fermions de Majorana. Les phases supraconductrices en volume (Sr_2RuO_4 , $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$), les états de surface topologiques, où la supraconductivité est induite (ex. $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ ou les structures artificielles comme $\text{Pb}/\text{Co}/\text{Si}(111)$), sont des candidats pour réaliser de tels systèmes. Associer corrélations fortes et topologie, domaine encore peu exploré, pourrait révéler des comportements tout à fait nouveaux. La prise en compte des effets de désordre peut aussi être pertinente pour tester la robustesse de certains états cohérents induits par les corrélations et protégés topologiquement.

La complexité des systèmes corrélés se révèle souvent à travers différents ordres en compétition. Dans le cas des cuprates, l'apparition de plusieurs brisures de symétrie : courants orbitaux, nématicité, ordre de charge et de spin annoncent les ordres émergents. Cette complexité s'accroît encore quand on tient compte de l'effet Kondo, qui intrique degrés de liberté de spin et de charge, ou intrication spin-orbite qui peut favoriser l'émergence de nouveaux ordres multipolaires. Des courants orbitaux ont par exemple été détectés dans les iridates, une nouvelle famille d'isolants de Mott caractérisée par son fort couplage spin-orbite. Des états « classiques » comme les ondes de densité de charge ont été revus à la lumière des progrès expérimentaux récents (diffraction cohérente, production d'états hors équilibre).

Une de ces brisures de symétrie particulièrement intrigante, d'autant plus qu'elle est difficile à détecter expérimentalement, est la nématicité qui affecte uniquement le degré de liberté de rotation et pas celui de translation. Ce concept a été particulièrement étudié ces dernières années dans les supraconducteurs au fer. Cet ordre trouve des signatures marquées dans les mesures de transport, transmission, Raman, RMN, neutrons, ARPES...

Par ailleurs, il est encore impossible de prédire théoriquement de manière *ab initio* l'existence d'une phase quantique émergente dans un nouveau composé. En général, ces phases sont découvertes par l'expérience, et il leur arrive parfois d'être nommées « ordre caché », en attendant qu'une théorie et des expériences complémentaires permettent de caractériser l'éventuel paramètre d'ordre sous-jacent.

À l'instar de la supraconductivité, le magnétisme quantique focalise une partie importante des activités de recherche dans le domaine des systèmes fortement corrélés. Les deux phénomènes peuvent être connectés puisque les fluctuations de spins quantiques peuvent être impliquées dans l'émergence de certains états supraconducteurs non conventionnels.

La frustration, qu'elle soit d'origine géométrique ou induite par le désordre, constitue la source de nouveaux états exotiques : liquides de spins, glaces de spins, phases de Coulomb, états fragmentés. La quête et la compréhension de matériaux « de Kitaev » et plus généralement des formes multiples de liquides de spins quantiques est au cœur de l'intense recherche actuelle. La frustration peut aussi s'avérer très utile pour les applications des systèmes multiferroïques, présentant à la fois des ordres magnétiques et ferroélectriques. En effet, une forte dégénérescence induite par frustration permet de réaliser des systèmes présentant un fort couplage magnéto-électrique avec une polarisation facilement renversable par application d'un champ magnétique. Bien que la plupart des études se concentrent sur les effets statiques, le défi à venir est de développer leur potentiel dans le couplage dynamique des degrés de spin et de charge. De nouveaux concepts ont émergés comme la magnonique,

où l'on propose d'utiliser les ondes de spin pour transporter et traiter des informations.

D. Conclusion

Les systèmes corrélés introduisent une complexité jamais encore égalée dans le traitement des transitions de phases dans les matériaux. Bien que déconcertant, ceci nous offre des combinaisons d'ordres quantiques inespérées pour générer de nouvelles phases, des excitations d'une nouvelle nature, et de nouvelles propriétés. La rencontre entre la physique des semi-conducteurs et des électrons est en train de s'opérer avec l'émergence des systèmes 2D. Avec la prise en compte de nouveaux concepts comme les corrélations de Hund, le désordre, le couplage spin-orbite, la topologie, les développements fondamentaux et applicatifs représentent une source intarissable pour repenser les technologies du futur pour une meilleure maîtrise de l'énergie.

VI. Théorie et modélisation

A. Introduction & méthodes

Si la recherche théorique a des problématiques propres, comme le développement d'outils conceptuels et numériques, l'essentiel des activités théoriques en section 03 est en forte synergie avec les activités expérimentales. À ce titre les domaines de recherche couvrent toutes les thématiques de la section, même si certains sujets attirent plus de chercheuses/chercheurs, à cause de leur complexité comme les systèmes corrélés, ou de leur nouveauté comme la physique hors d'équilibre en régime transitoire, ou les effets topologiques.

Prédire, comprendre, expliquer les propriétés électroniques ou magnétiques de la matière condensée restent les mots clés, que ce soit :

- pour la description de systèmes spécifiques avec un objectif quantitatif par les méthodes entièrement quantiques dites de premiers principes (DFT) les résultats théoriques pouvant directement être comparés aux résultats expérimentaux,

- pour décrire des phénomènes génériques, communs à toute une classe de systèmes, – à l'aide de modèles quantiques effectifs se concentrant sur les interactions dominantes responsables des propriétés étudiées et intégrant implicitement les degrés de liberté non pertinents pour ces dernières, – ou à l'aide de modèles semi-classiques intégrant les aspects thermodynamiques et statistiques.

D'un point de vue méthodologique, ces dernières années ont été marquées par une ouverture vers l'adaptation à la matière condensée de concepts ou de méthodes numériques issus d'autres domaines scientifiques. Ainsi les concepts issus de l'information quantique ont été adaptés pour mesurer l'intrication quantique (spectres d'intrication, entropie d'intrication, etc.) dans les systèmes fortement corrélés. Ces nouveaux concepts ont non seulement permis de mieux classer et caractériser les états de basse énergie et les transitions de phases, mais aussi d'identifier de nouveaux phénomènes comme la localisation Many-Body ou concevoir de nouvelles méthodes numériques permettant d'accéder à des problèmes/systèmes autrefois difficilement accessibles comme les modèles corrélés sur les réseaux bi-dimensionnels.

Une autre ouverture notable a été faite avec l'adaptation de méthodes issues de la chimie théorique comme la partition Quantum Mechanics (QM) / Molecular Mechanics (MM) qui permet de séparer spatialement la partie sur laquelle est focalisé l'intérêt et que l'on traite de manière quantique QM, du reste du système qui est traité de manière classique MM. Ce type de technique initialement utilisée pour séparer la partie réactive du reste d'un grand système est aujourd'hui adaptée à la matière condensée,

par exemple pour mieux décrire l'absorption lumineuse dans un système photovoltaïque réaliste.

Enfin une ouverture encore timide se fait vers les techniques du machine learning que ce soit pour la modélisation des mécanismes de croissance de matériaux que pour l'exploration théorique des diagrammes de phases.

Bien entendu ces travaux ne doivent pas faire oublier les avancées réalisées tant dans les concepts établis pour décrire les états émergents de la matière quantique, comme les quasi-particules de Weyl ou les fermions de Majorana, les objets topologiques tels que des vortex ou des skyrmions, ou dans les méthodes centrales du domaine que ce soit le groupe de renormalisation, les méthodes de réseaux de tenseurs, de DMRG, DMFT, Monte-Carlo quantique etc.

B. Les systèmes corrélés

L'étude tant des diagrammes de phases et des transitions de phases (transition de Mott, de Kosterlitz-Thouless, transition BEC/BCS, etc.) que des excitations exotiques invalidant l'image de particules indépendantes (anyons, fermions de Majorana, électromagnons, etc.) rencontrées dans les systèmes fortement corrélés reste un des enjeux actuels.

Dans ce domaine les systèmes phares restent les composés magnétiques et supraconducteurs. Ainsi au cours de cette mandature beaucoup d'attention a été accordée aux systèmes magnétiquement frustrés et notamment aux effets de couplage magnéto-électrique, à la dynamique des glaces de spin et aux nouveaux concepts de liquides de spins modulés ou chiraux ; les enjeux actuels étant dans le premier cas la compréhension des degrés de liberté responsables de l'amplitude de l'interaction magnéto-électrique et dans le second cas celle de la dynamique de ces systèmes avec les monopoles magnétiques, la cristallisation de charge, la fragmentation de moment magnétique, etc. Dans le domaine de la supra-

conductivité, la découverte de nouveaux matériaux supraconducteurs à des températures proches de l'ambiante ou dans des systèmes bi-dimensionnels a nourri une activité de calculs premiers principes (entre autre par des méthodes de Monte-Carlo quantique ab-initio).

C. Systèmes mésoscopiques

Trois grands thèmes au cœur de la physique mésoscopique théorique seront soulignés ici : le contrôle quantique avec la simulation en temps réel du transport mésoscopique dans des dispositifs à électron unique, la physique à N-corps (qui relève aussi des systèmes corrélés) et la topologie.

Dans les systèmes mésoscopiques fortement corrélés un des maître-mot est l'ingénierie de l'environnement en couplant un système quantique simple mais fortement non-linéaire à un bain macroscopique (d'électrons, de photons...) pour créer des états mixtes invalidant l'image de particules indépendantes. Un second défi est la théorie du transport hors-équilibre. Au-delà de travaux sur la détermination de relations fluctuation dissipation génériques dans des systèmes fortement hors équilibre et non stationnaires, des progrès ont été réalisés grâce à des méthodes de Monte Carlo Quantique pour décrire les caractéristiques courant-tension de points quantiques, grâce à des méthodes groupe de renormalisation (NRG) pour décrire le transport thermique dans l'état Kondo ou l'effet Hall fractionnaire. Enfin l'étude des jonctions reste toujours d'actualité (Josephson multicanaux, couplées à une ligne de transmission, etc.) avec des prédictions toujours étonnantes comme la compression d'états photoniques micro-onde. Parmi les défis qui restent à relever celui de la structuration spatiale d'états corrélés (nuage Kondo) nécessitera l'élaboration de nouvelles méthodes encore à imaginer.

D. Topologie de la surface de Fermi

Les matériaux dits topologiques (systèmes 2D : Graphène, Phosphore noir et 3D : $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$) se caractérisent par un croisement de bandes ayant une dispersion linéaire (cônes de Dirac-Weyl) au niveau de Fermi. Ils ont la particularité de présenter des états de bords protégés, similaires aux états supportant l'effet Hall fractionnaire, et ayant des caractéristiques uniques. Si dans un premier temps l'essentiel des travaux ont concerné la caractérisation de ces matériaux topologiques (détermination de leur nombre de Chern), Aujourd'hui les efforts portent plutôt sur leur manipulation (fusion de cônes de Dirac) ou sur des systèmes présentant un fort couplage spin-orbite. En effet, dans ces systèmes les états de bords peuvent donner lieu à des courants de spins, les électrons avec les deux états de spins se propageant dans des directions différentes (effet Hall quantique de spin). L'intérêt de tels systèmes est un déplacement de charge nul.

E. Polaritons

Une des richesses des polaritons est leur capacité de conserver et de mélanger les propriétés des excitations d'origine (photons, phonons, plasmons...). La diversité de propriétés observées dans ces systèmes hybrides et la possibilité de contrôler le couplage ont permis d'utiliser ces systèmes comme prototypes pour simuler, par analogie, des systèmes physiques apparemment très différents par leur nature et échelles d'énergie comme ceux de la relativité générale ou de la cosmologie.

D'un point de vue théorique les défis dans la modélisation de ces systèmes résident dans la détermination et le traitement des degrés de liberté permettant de décrire l'intégralité de la complexité du système. Les travaux actuels se concentrent essentiellement sur la compréhens-

sion des propriétés dynamiques et des phénomènes de transport (thermodynamique quantique et évolution hors d'équilibre).

F. Spintronique

Depuis quelques années de nouveaux domaines de recherche sont apparus qui relèvent de l'étude des ordres magnétiques complexes et des phénomènes de transport de spins dans les matériaux massifs et aux interfaces, comme la skyrmionique, la nanoferronique et la spin-orbitronique. Ces domaines connaissent des développements théoriques importants grâce à l'avancée des méthodes premiers principes (DFT) qui permettent de déterminer tant les propriétés structurales que magnétiques et de transport ou lorsque le degré de complexité est trop élevé par des méthodes multi-échelles où des Hamiltoniens modèles sont paramétrés par des calculs DFT sur des systèmes plus simples. Il est ainsi possible d'explorer l'intégralité de l'espace des phases, de caractériser de façon réaliste les matériaux à l'échelle atomique, et de modéliser le transport via les formalismes de Landauer-Büttiker, Kubo ou Keldysh.

VII. Infrastructures de recherches

Les grands instruments occupent une place très importante dans les thématiques de recherche de la section 3. Les équipements mis à disposition de la communauté française se renouvellent constamment, permettant de fournir des conditions expérimentales à la hauteur de la compétition internationale, à la fois au niveau des sources de rayons X, de neutrons, de champs magnétiques intenses et des centrales de nanotechnologie.

A. Les sources de rayons X synchrotron et XFEL

Dotée d'un synchrotron national et participant largement aux sources européennes, la France est bien placée pour permettre l'accès aux sources de rayons X de dernière génération à la communauté. De nombreuses thématiques de la section 3 sont concernées par les techniques disponibles auprès de ces très grands instruments : spectroscopies de photons (absorption, émission...) et d'électrons (PES, ARPES), diffraction, diffusion, cohérence, dichroïsme magnétique, microscopie, techniques résolues en temps etc. Le paysage des grands instruments de rayons X est actuellement en plein renouvellement, avec des projets de jouvence des deux synchrotrons implantés sur le sol français, et le démarrage du laser à électrons libres européen (European XFEL).

Le synchrotron SOLEIL, dispose de tout l'éventail de techniques d'intérêt pour la communauté de la section 3, qui est aujourd'hui utilisatrice de presque deux tiers de ses lignes de lumières. Dans le cadre de la programmation d'une jouvence dans les années à venir, les chercheurs visent à définir une nouvelle machine qui produira des faisceaux plus brillants et plus cohérents en limitant la taille de source et l'émittance horizontale avec des caractéristiques temporelles des impulsions de rayons X du même ordre de grandeur.

L'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) est une machine d'énergie supérieure à celle de SOLEIL, elle en est parfaitement complémentaire. Parmi les 5 lignes de lumière françaises installées à l'ESRF, deux sont pleinement dans les thématiques de la section 3. L'ESRF est actuellement dans un programme de jouvence. La nouvelle machine, appelée ESRF-EBS (pour Extremely Brilliant Source), permettra de générer des faisceaux cent fois plus brillants et cohérents et devrait être disponible en 2020. Le calendrier décalé des jouvences de l'ESRF et de SOLEIL permet la continuité de l'utilisation de ces sources par les utilisateurs.

Accessible depuis 2017, European XFEL est un accélérateur linéaire d'électrons permettant de générer des trains d'impulsions de rayons X particulièrement brillants, ultra-courts et cohérents, possédant ainsi toutes les caractéristiques des faisceaux laser. Il est particulièrement intéressant pour les études de dynamiques à l'échelle femtoseconde en matière condensée, ou pour combiner imagerie cohérente et dynamique hors-équilibre. L'accès à la communauté française ne fait que démarrer, mais va venir en complément des sources déjà existantes dans le domaine des rayons X durs et mous.

B. Un paysage de la neutronique en plein changement

L'utilisation des neutrons occupe une place très importante dans la section 3, avec en particulier les études liées aux structures et excitations magnétiques. Jusqu'à présent, deux sources de neutrons implantées en France étaient à disposition de la communauté : Orphée à Saclay et l'ILL à Grenoble. Suite à la décision de fermer Orphée fin 2019, différents projets ont vu le jour pour à la fois conserver l'expertise française dans ce domaine, et permettre aux utilisateurs de continuer à bénéficier d'un environnement favorable pour mener leurs expériences. Le premier est la construction de 5 nouveaux instruments destinés à la source européenne à spallation ESS en partenariat avec d'autres pays membres. Ces instruments permettront de couvrir l'ensemble des thématiques d'intérêt pour la section 3. Par ailleurs, les lignes CRG françaises seront renforcées à l'ILL, avec 3 instruments pilotés par le LLB, 1 par le CNRS et l'UGA, et 3 par le CEA. Enfin, une source compacte de neutrons française est à l'étude (SONATE). L'objectif est de fournir à la communauté, des instruments avec des flux comparables à Orphée d'ici 5 à 10 ans. Il est à noter que l'ensemble des personnels du LLB qui avaient une activité liée à Orphée sont tous rattachés à un de ces projets ce qui garantit une continuité de l'activité et des

savoir-faire pour la communauté. Une fédération de neutronique – la 2FDN – a été mise en place dans le but d'animer, planifier et gérer les activités liées à la neutronique en France.

Enfin, bien qu'aucune source de ce type n'existe en France, une partie des chercheurs est également utilisatrice de muons pour les études liées au magnétisme.

C. Champs magnétiques intenses

Les études dans le domaine des champs magnétiques intenses, supérieurs typiquement à la vingtaine de Teslas, sont réalisées et développées au Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), sur le site de Grenoble pour les champs continus et sur le site de Toulouse pour les champs pulsés. Une grande variété de mesures physiques sous champs magnétiques intenses est proposée dans différentes gammes de température et de pression : mesures de grandeurs thermodynamiques, magnétométrie statique et/ou de susceptométrie dynamique, métrologies magnéto-optiques, mesures de magnéto-transport ou encore mesures de résonance magnétique nucléaire. Ces différentes méthodologies expérimentales intéressent fortement les thématiques majeures de la section 03, en physique des semiconducteurs, supraconducteurs et matériaux magnétiques. Ces offres expérimentales sont complétées par des installations transportables de champs pulsés, pour des expériences sous des champs magnétiques avoisinant la cinquantaine de Tesla sur source synchrotron (ESRF et SOLEIL), sur source de neutrons (ILL) ou encore sur source laser intense (LULI).

Un effort constant de développements instrumentaux est assuré tant au niveau des différentes installations de mesures que dans la production des champs magnétiques les plus intenses. Le LNCMI détient le record européen de champ magnétique pulsé milliseconde à 98.8 T ainsi que le record mondial de la

durée des champs magnétiques dépassant 80 Tesla. La production de champs megagauss n'est pas en reste : selon le diamètre utile et la température requis, des champs magnétiques de 100 T à 260 T peuvent être atteints.

D. Les centrales Renatech

Le réseau Renatech regroupe des infrastructures et des moyens lourds en micro-nanotechnologies répartis sur le territoire national au sein de 5 laboratoires fortement impliqués dans le développement technologique et rassemblant des compétences scientifiques allant du matériau aux systèmes. Ces laboratoires hébergent 8 300 m² de salles blanches dotées d'équipements de pointe ouverts à la communauté scientifique. Les domaines scientifiques adressés sont la microélectronique, la photonique, les MEMS, les micro-

nanoobjets et la caractérisation et l'instrumentation.

On retrouve dans les cinq grandes centrales des moyens de croissance des matériaux (i.e. silicium, III-V, nitrures, matériaux 2D, oxydes fonctionnels, niobate de lithium), de structuration (i.e. lithographie électronique, laser, UV), et de caractérisation physique (i.e. TEM, diffraction X). Depuis quelques années, les centrales élargissent l'offre technologique avec des bâties de dépôt par *Atomic Layer Deposition*.

Les centrales régionales viennent compléter l'offre du réseau RENATECH et permettent aux chercheurs de combiner des techniques hybrides. On dénombre actuellement environ 24 centrales régionales, réparties sur tout le territoire. Elles offrent environ 5 000 m² de salle blanche de micro-nanofabrication. Cet ensemble (RENA-TECH et les centrales régionales) forment aujourd'hui le réseau RENATECH+.

SECTION 04

ATOMES ET MOLÉCULES, OPTIQUE ET LASERS, PLASMAS CHAUDS

Composition de la section

Laurence PRUVOST (présidente de section), Hinrich LUTJENS (secrétaire scientifique), Lionel AMIAUD, Bernadette BERGERET, Jean-Claude BERNARD, Ludovic BIENNIER, Thomas BOURDEL, Marc BRUNEL, Annette CALISTI, Florent CALVO, Patrice CAMY, Charles DESFRANÇOIS, Alicia DOMARACKA-ROUSSEAU, Stéphane FAURE, Mario GATTOBIGIO, Christine GRAUBY-HEYWANG, Saida GUELLATI-KHELIFA, Nadine HALBERSTADT, Lionel POISSON, Stéphane SEBBAN, Abdelmadjid TAKI.

Résumé

Le cœur de métier de la section 04 est la physique fondamentale de la matière diluée, l'optique, les lasers et les plasmas chauds. Il repose sur des expériences de pointe aussi bien de coin de table que sur de grands instruments et des approches théoriques et numériques des plus performantes. Des avancées majeures ont été réalisées dans plusieurs domaines : lasers ultra-courts et leurs applications, physique quantique reliant désormais l'atome unique à la matière condensée, extension des atomes ultra-froids à de nouvelles espèces et applications, nouveaux records en métrologie des fréquences et redéfinition des unités, premiers signaux d'ondes gravitationnelles, sources et protocoles d'optique quantique formant un des socles des technologies

quantiques, développement des lasers ultra-puissants pour l'interaction lumière-matière en conditions extrêmes, et enfin dynamique des plasmas de fusion et interaction plasma-surface qui contribuent ensemble à l'avancée des ambitieux projets LMJ et ITER. Ces recherches ont reçu des reconnaissances prestigieuses dont le prix Nobel de physique de 2018, ainsi que des financements conséquents, ouvrant la voie à des innovations sociétales via brevets, partenariats et entreprises.

Introduction

Les thématiques de la section 04 concernent les processus impliquant des objets « simples » allant de l'atome, la molécule jusqu'à l'agrégat ou la molécule impliquée dans des systèmes vivants. Ces objets sont placés en milieux dilués mais aussi près de surfaces, en matrices cristallines ou dans des environnements biologiques. Les recherches visent à comprendre ces objets en soi, leur évolution, leur réactivité, les interactions entre eux mais aussi avec des champs extérieurs. Elles s'appuient sur des techniques très diverses couvrant des sources de particules elles-mêmes variées (froides, chaudes, en jets, en sprays, etc.), des sources optiques tout aussi variées (lasers continus, en impulsions ou sources issues de grands équipements), des méthodologies de plus en plus élaborées (spectroscopies, temps de vol, imagerie super-résolue) et souvent combinées entre elles. Ces techniques sont elles-mêmes au centre de nombreuses recherches afin de les rendre de plus en plus performantes, de les adapter aux objets d'étude et d'en faire des plateformes de recherches. Les développements instrumentaux et expérimentaux couvrent une diversité grandissante d'échelles de temps et d'espace. Ils sont par ailleurs confortés par des approches théoriques et numériques créatives et de haut niveau, empruntant souvent l'expertise de disciplines voisines en physique de la matière condensée, en chimie, en informatique, voire en mathématiques, contribuant également à élucider la nature « multi-échelles » des problèmes traités.

Toutes ces facettes des activités qui ont contribué à faire progresser des champs à un niveau inégalé seront abordées au fil du rapport. Des exemples seront donnés comme illustration soulignant notamment le caractère souvent interdisciplinaire de nombreux champs thématiques.

Avant d'aborder ces activités nous présentons globalement les thématiques, précisons les effectifs et les structures de recherche.

Thématiques et effectifs

Pour des raisons notamment historiques, les mots-clés de la section 04 ont été listés comme suit :

- Processus fondamentaux en physique quantique, physique atomique, atomes froids, gaz quantiques, métrologie ;
- Molécules et agrégats : en phase diluée, en surface, en phase condensée ; structure et dynamique, applications à la physicochimie ;
- Spectroscopie atomique et moléculaire : applications à l'environnement, à l'astrophysique et aux sciences de la vie ;
- Collisions atomiques et moléculaires : processus réactionnels, interactions avec des surfaces.
- Lasers, optique quantique, optique non linéaire, optique ultrarapide, propagation ;
- Optique dans les solides, matériaux pour l'optique, nanoptique, plasmonique, biophotonique ;
- Plasmas chauds : hydro- et magnétohydrodynamique, turbulence plasma, instabilités, interaction ondes-particules, physique atomique, sources secondaires, régime relativiste ;
- Fusion thermonucléaire contrôlée (magnétique et inertielle) pour l'énergie.

Ces champs de recherche ne sont pas disjointes et beaucoup d'entre eux interagissent, se chevauchent et se rejoignent. Ces points d'intersection apparaîtront naturellement dans la suite du rapport.

Structure du rapport

Pour une présentation synthétique, les champs ont été regroupés et répartis en quatre thématiques qui constitueront autant de parties du rapport :

- Physique quantique des atomes et des photons ;
- Physico-chimie des molécules, agrégats et nanoparticules ;
- Lasers, optique non-linéaire, photonique et imageries ;
- Plasmas chauds.

Une annexe donne les unités rattachées à la section 04 et les GDR rattachés secondairement.

Effectifs

Chercheurs CNRS. La section compte près de 300 chercheurs⁽¹⁾ CNRS, dont 284 sont affectés dans des unités rattachées à la section 04. S'y ajoute une trentaine de chercheurs émérites. Le taux de femmes, de 19,5 %, y est constant depuis plus de 15 ans. Sur cette période, l'effectif de la section a diminué de 7%. Le nombre annuel de recrutés baisse depuis une décennie, ayant atteint 5 CRCN en 2019, soit 1/60 de l'effectif total. Si ce taux était maintenu, compte tenu de la pyramide des âges, alors plus de 15 % de l'effectif de la section 04 pourrait avoir disparu d'ici 10 ans. Cette perte, même atténuée de quelques recrutements de DR et quelques changements de section vers la 04, risque de créer des sujets orphelins et la perte des compétences associées.

La répartition par grade est de 52 % en CRCN et 48 % en DR avec des taux de femmes respectifs de

17,5 % et 21,5 % et un âge moyen de 48 ans. La section 04 fait partie des quelques sections qui ont un taux de femmes DR supérieur au taux de femmes global dans la section. Le nombre de chercheurs qui ont atteint les grades DR1 et DRCE est faible, respectivement 46 et 11, soit combiné 19 % de l'effectif. Le nombre de femmes dans ces grades est 9 et 0 soit 15 % de l'effectif féminin.

Les chercheurs de la section 04 affichent une mobilité importante. En 5 ans une tren-

taine de chercheurs ont changé d'unité ou de région géographique. Avec eux ont migré des sujets et des techniques qui enrichissent le potentiel recherche.

Les chercheurs sont engagés dans diverses tâches d'organisation et de structuration de la recherche allant de responsables d'équipe à chefs de projets nationaux, européens et internationaux. Au 1er janvier 2020, on compte 13 directeurs d'UMR ou FRE, un directeur d'UMI, 9 directeurs de GDR, 1 directeur du centre de physique des Houches, 2 chargées de mission au CNRS et une directrice d'institut. Au niveau européen une quinzaine de projets ERC ont été ou sont menés par des chercheurs de la section 04 depuis une dizaine d'années.

Tableau 1 : chercheurs de la section 04

	31/12/ 2009	31/12/ 2015	31/12/ 2017	31/12/ 2018
DR femmes	130	135 21%	145 22%	144 (48%) 21,5%
CRCN femmes	184	160 19%	156 17%	154 (52%) 17,5%

Tableau 2 : personnels des unités rattachées à la section 04, au 01/09/2019

Chercheurs CNRS	284
Enseignants-Chercheurs	507
Chercheurs Autres Organismes	49
Doctorants	436
Postdoctorants	50
Autres Chercheurs Non Permanents	108
ITA permanents CNRS	253
ITA Permanents Non CNRS	198
ITA Contractuels CNRS	51
Personnels Temporaires Non CNRS	73

Autres chercheurs, ITAs et non-permanents. Les travaux de recherche relevant de la section 04 sont faits conjointement avec des chercheurs d'autres organismes, des ensei-

gnants-chercheurs, des ingénieurs, des personnels en CDD (doctorants, post-doctorants, ingénieurs, etc.) et des chercheurs d'autres sections (notamment des sections 02, 03, 13, 08) ayant des thématiques complémentaires. Le décompte de ces personnels donne environ 600 chercheurs non-CNRS, 500 ITA et 600 doctorants/post-doctorants.

Répartitions

Unités et géographie. Les unités rattachées à la section 04 en principal sont au nombre de 20 (liste en annexe). S'y ajoutent 1 UMI, 4 fédérations de recherche et 9 GDR. D'autres unités (environ 20) s'y rattachent en secondaire via les disciplines étudiées.

Géographiquement les chercheurs (CNRS et non-CNRS) se répartissent sur le territoire métropolitain avec une dominance en Ile de France où plus de 50% des chercheurs CNRS de section 04 y sont recensés. Une dizaine de chercheurs sont affectés dans des laboratoires internationaux.



Répartition des chercheurs de section 04 au 31/12/2017⁽²⁾

Répartition selon les thématiques. La population de chercheurs CNRS se répartit de façon équilibrée sur les 4 thématiques définies ci-avant. La proportion théorie/expérience est difficile à chiffrer car beaucoup de chercheurs peuvent prétendre aux deux étiquettes. Les liens entre expérimentateurs et théoriciens, y compris d'autres sections, sont fréquents et très fructueux comme manifesté dans de nom-

breuses publications conjointes dans les plus grandes revues. Cette synergie est entretenue depuis longtemps au sein des unités de la section 04.

L'analyse du vivier des candidats au concours CRCN ainsi que les retours des comités Hcéres confirment globalement la répartition équilibrée et montrent que chacune de ces thématiques héberge des sujets porteurs. L'excellence internationale qui leur est associée s'appuie en général sur un héritage culturel et scientifique lié à la pérennité des unités de recherche et à la façon qu'a le CNRS de garder et perpétuer les acquis.

Certaines recherches voient cependant leurs effectifs diminuer d'année en année, comme certains sujets traditionnels de physique atomique, de spectroscopie laser ou de méthodologie de calculs de structures atomiques et moléculaires. Il serait dommageable que ces compétences, détenues en France à un très haut niveau d'expertise, soient compromises sous l'effet de modes ou de priorités données dans les appels à projets.

GDR et réseaux

Les recherches de la section 04 s'appuient largement sur la structuration en groupes de recherche (GDR) et en fédérations de recherche (FR) mise en place par le CNRS. Ces structures sont une source de liens scientifiques et d'échanges. Elles facilitent la mise en commun d'idées ou d'équipements et la construction de projets. Les GDR en question émanent non seulement de l'INP⁽³⁾ mais aussi d'autres instituts (INSIS, INC, INSB, IN2P3), ce qui témoigne du caractère fortement interdisciplinaire des recherches menées en section 04, en lien avec la physique des particules, l'astrophysique, la nano-physique, l'optique, la chimie, la bio-photonique et les sciences du vivant.

Il est fréquent que des écoles thématiques proviennent des GDR. Elles délivrent des formations spécifiques et d'excellence notamment aux jeunes chercheurs. Certaines sont

récurrentes et désormais reconnues au niveau international.

Nous donnons ci-après la liste des GDR et FR attachés à la section 04 à titre principal. Les GDR rattachés à la section 04 en secondaire sont listés en annexe.

- AF : Atomes Froids
- ELIOS : Effets non-linéaires dans les fibres optiques
- EMIE : Edifices Moléculaires Isolés et Environnés
- IQFA : Ingénierie Quantique, Fondements et Applications
- LEPICE-HDE : Lasers énergétiques et intenses et plasmas sous conditions extrêmes
- SPECMO : SPECTroscopie MOléculaire
- THEMS : Dynamique quantique dans les systèmes moléculaires : théorie, modélisation, simulation
- MecaQ : Opto-mécanique et nano-mécanique quantiques
- UP : Ultrafast Phenomena
- FCM : Fédération de Recherche sur la Fusion par Confinement Magnétique ITER

Soulignons aussi le rôle de la Société Française de Physique et plus particulièrement de la division thématique PAMO (*Physique Atomique Moléculaire et optique*) qui par ses congrès réguliers entretient une véritable vie de la communauté. Une forte proportion des chercheurs de la section 04 en fait partie.

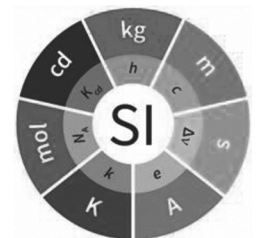
I. Physique quantique des atomes et des photons

La physique quantique, la physique atomique et l'optique quantique sont depuis longtemps des thèmes fondateurs de la section 04. Ils ont fortement évolué en quelques décen-

nies, grâce notamment à l'amélioration incessante des lasers, qui permettent désormais une spectroscopie ultra-précise, grâce aux détecteurs qui permettent la visualisation de particules ou des photons uniques et grâce à l'utilisation de plus en plus courante d'espèces atomiques et ioniques refroidies et piégées.

La maîtrise du piégeage est tellement précise – atomes uniques ou en réseau de pièges – que l'on peut contrôler précisément l'interaction entre les atomes et ainsi faire le pont entre la matière diluée et la matière condensée. Ce pont se fait avec un nombre de particules allant de quelques unités à quelques milliers. Ces réalisations expérimentales permettent de répondre à des questions de physique quantique persistantes comme le rôle de l'intrication et de la corrélation. Elles ont aussi permis de réaliser des modèles de matière exotique ou topologique ressemblant à celle de la matière condensée dont les études ont conduit au prix Nobel de 2016.

La précision spectroscopique – métrologie des fréquences – a atteint des records. Avec ses 18 chiffres significatifs, elle permet par la mesure, des expériences pour des tests fondamentaux, le principe d'équivalence, l'électrodynamique quantique ou le modèle standard. Les avancées en métrologie ont conduit à la redéfinition du système international d'unités (avec abandon du kilogramme) pour laquelle les chercheurs du domaine ont été fortement impliqués.



Un kilogramme étalon ; le nouveau système d'unités

Les sources atomiques classiques (vapeurs, jets) d'atomes ou d'ions restent néanmoins très pertinentes pour étudier des processus fonda-

mentaux impliqués dans les technologies quantiques, dans la chimie, dans l'interaction atome-surface, pour explorer les non-linéarités de l'interaction atome-photon ou les processus de collision ou de photo-ionisation. Elles servent aussi dans des études amont du projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

Dans ce qui suit, le focus choisi sur les gaz quantiques, la métrologie, les technologies quantiques vise à rendre compte des progrès importants dans ces domaines.

Atomes froids et gaz quantiques

Atomes froids : Ils sont désormais présents dans une dizaine de laboratoires de la section 04, avec diverses espèces (alcalins, gaz rares, alcalino-terreux, etc.) et avec divers types de pièges (cellule, microcircuits, pièges à 3 dimensions ou de dimensions réduites, pièges magnéto-optiques, magnétiques ou tout optique, etc.). Les atomes froids sont au cœur de nombreuses études allant des collisions et molécules froides à la mesure de la gravité en passant par l'interaction avec les photons (métrologie, diffusion, localisation, etc.). Le GDR AF permet de fédérer les différents acteurs.

Les énergies caractéristiques, cinétiques et potentielles, extrêmement basses, vont de pair avec des temps d'évolution typiques accessibles expérimentalement allant de la milliseconde et à la seconde, et permettant l'étude des dynamiques quantiques. Couplée à la détection des atomes individuels, la physique des atomes froids ouvre la porte à l'étude des corrélations quantiques. Enfin, il faut noter l'évolution récente vers les mélanges quantiques, les atomes à deux électrons (strontium, ytterbium...) ou les atomes avec un fort moment magnétique de spin (chrome, dysprosium), qui apportent de nouvelles questions liées aux interactions atome-atome et spin-spin.

Les atomes froids comme sources pour former des molécules (par photoassociation ou par excitations successives permettant l'association des atomes) continuent à être un sujet-clé pour la compréhension de la chimie froide. Le sujet produit des données spectroscopiques de haute résolution et permet des couplages avec les théoriciens- numériciens qui améliorent les descriptions des molécules, les potentiels moléculaires, notamment ceux des états électroniques excités. Il s'en suit souvent des propositions expérimentales ouvrant vers la formation de molécules stables ou dans leur niveau fondamental.

Gaz quantiques. Outre les aspects de mesures de précision (voir le paragraphe suivant), les gaz ultra- froids constituent des systèmes modèles pour la physique quantique et notamment pour la physique à N-corps. A ce titre, les gaz quantiques sont considérés comme des simulateurs quantiques car ils permettent d'étudier, grâce à un environnement contrôlé, des régimes où la théorie et la simulation numérique atteignent leurs limites.

Ainsi, au prix d'une complexité croissante des dispositifs, heureusement contrebalancée par des avancées technologiques, les gaz quantiques simulent la matière condensée et des systèmes fortement corrélés. Pour ces simulations, les gaz quantiques offrent l'avantage d'une interaction entre les particules finement contrôlable, non seulement via leur position mais aussi en changeant la force de l'interaction : cela s'effectue par des champs extérieurs (résonance dite de Feshbach) ou en excitant fortement les atomes (états de Rydberg). Les pièges et les réseaux de pièges sont variables à loisir, en nombre, forme et géométrie, profondeur, grâce à des techniques de pinces optiques de plus en plus fines basées sur l'utilisation de modulateurs de lumière. Ainsi la balance entre piégeage et interaction atome-atome est grandement ajustable.

Sans chercher à couvrir l'ensemble de ces recherches, nous soulignons maintenant quelques résultats récents : la propagation des ondes sonores (1^{er} et 2^e sons) dans un gaz à 2D/3D de bosons homogène superfluide ; l'observation du mécanisme de Kibble-Zurek de

création de défauts lors de la traversée rapide d'une transition de phase ; la dynamique de spins d'un condensat de chrome ; l'interaction de longue portée géante obtenue par des atomes de Rydberg distants de plusieurs microns ; la formation de gouttelettes quantiques piégées et stabilisées par les fluctuations quantiques. Des phases avec des propriétés topologiques non-triviales ont été proposées, certaines réalisées. Des mélanges quantiques ont permis d'étudier le mouvement contre-propageant d'un condensat de Bose dans un superfluide fermionique.

Les gaz quantiques sont de plus en plus utilisés pour la dynamique. Au-delà de la superfluidité déjà mentionnée, on les utilise pour créer des vortex, pour des études de transport quantique, dans lesquelles sous conditions spécifiques, peut apparaître le chaos quantique ou classique. Ces conditions donnent des réalisations expérimentales pour des sujets fondamentaux historiques mais toujours actuels.

Il serait réducteur de voir la simulation quantique uniquement par les atomes froids. D'autres systèmes offrent des alternatives pertinentes et intéressantes avec des montages expérimentaux parfois plus compacts ou offrant des observables différentes. Tel est le cas des condensats de polaritons, des nano-objets pour l'optique ou des fluides de lumière interagissant avec un milieu non-linéaire. Ces systèmes sont aujourd'hui des systèmes pertinents pour la simulation quantique, par exemple pour l'étude d'équations de Schrödinger non-linéaires.

Métrologie et tests fondamentaux

Tester les théories du modèle standard avec des expériences à basse énergie et de taille humaine est aujourd'hui une réalité tangible grâce aux progrès spectaculaires en métrologie. Les atomes ultra-froids, la manipulation cohérente des ondes de matière et les avancées

techniques des lasers sont en effet à l'origine de méthodes expérimentales robustes permettant de mesurer de nombreuses grandeurs physiques à partir de mesures de fréquences. C'est pourquoi il est important de développer et disséminer des références de fréquence exactes et ultra-stables.

La France dispose des meilleures horloges micro-ondes du monde. Elles utilisent des atomes froids dans un dispositif de fontaine, et définissent actuellement la seconde. En matière de précision les horloges micro-ondes sont supplantées depuis quelques années par les horloges optiques qui utilisent l'atome de strontium et de mercure. Leurs performances en stabilité et en exactitude sont à l'état de l'art. Même si les atomes neutres sont prometteurs, la meilleure horloge optique est pour l'instant une horloge à ions. Notons aussi que certains groupes dans le monde progressent dans l'exploration de transitions nucléaires situées dans le domaine optique en particulier dans le thorium.

Pour effectuer les mesures de précision, la référence de fréquence d'une horloge très précise doit être accessible et comparée. Pour ce faire, ces dernières années, la communauté a initié le réseau REFIMEVE+ (*REseau Fibré MEtrologique à Vocation Européenne+*) qui transporte déjà la référence de fréquence entre quelques universités à travers le réseau fibré. L'extension de ce réseau va permettre bientôt la dissémination de la référence de fréquence dans de nombreux laboratoires français et vise ensuite l'échelle européenne. Ce réseau permettra aussi d'enrichir les données des inter-comparaisons entre horloges atomiques sur le long terme qui sont exploitées par les théoriciens pour contraindre les modèles théoriques dédiés à la recherche de la signature de la matière noire.

La France a un rôle de premier plan en interférométrie atomique, avec la meilleure mesure de la constante de structure fine et les meilleurs senseurs inertiels. S'en suit son implication dans de grands projets qui en dépendent.

La constante de structure fine est maintenant déduite de la mesure du rapport h/M (constante de Planck sur la masse de l'atome de rubidium) par une technique combinant interférométrie atomique et oscillations de Bloch. Le niveau d'exactitude est tel qu'il fournit le test le plus précis de l'électrodynamique quantique. Avec la nouvelle définition du kilogramme, cette méthode va relier avec précision la masse d'un atome à une mesure de fréquence.

Après deux décennies de recherche, le bilan concernant les senseurs inertiels (gyromètres et gravimètres atomiques) est remarquable. Ils ont conduit, non seulement à des appareils de terrain pour la géophysique, mais aussi à de grands projets de physique fondamentale. De façon générale, un interféromètre atomique mesure un déphasage imprimé sur l'onde de matière ; provenant de différents types d'interactions. Avec cette approche, on tente d'étudier les forces à courte distance entre un atome et une surface afin de mesurer la gravitation à courte distance et la force de Casimir. Il est aussi envisagé via le projet MIGA (*Matter wave laser based Interferometer Gravitation Antenna*) d'obtenir une signature d'onde gravitationnelle, complémentaire de celle de LIGO/VIRGO. Les senseurs inertiels sont aussi candidats pour tester la neutralité de l'atome ou pour des mesures en mission spatiale.

Signalons aussi que l'expertise métrologique française est un élément-clé dans des collaborations internationales, comme celle de GBAR (*Gravitational Behaviour of Anti-hydrogen at Rest*) qui vise à tester le principe d'équivalence sur l'anti-hydrogène, ou celle d'ELGAR (*European Laboratory for Gravitation and Atom- interferometric Research*) dont l'ambition est de réaliser un premier interféromètre atomique à grande échelle pour détecter les ondes gravitationnelles.

La métrologie des fréquences est aussi une clé de la spectroscopie de haute résolution, notamment pour celle de l'hydrogène ou celle de molécules chirales dans le but de percer l'énigme du rayon du proton ou de la violation de la parité.

Technologies quantiques

Optique quantique. Ce domaine regroupe les études dans lesquelles la lumière est un objet quantique, ainsi que son interaction avec la matière. Les variables quantiques du photon, à savoir l'énergie, le moment linéaire, la polarisation et le moment orbital angulaire, sont mises à profit pour créer des états quantiques, des superpositions, des intrications et réaliser des situations purement quantiques où les descriptions classiques ne peuvent plus être pertinentes. L'interaction photon-matière, pour la section 04, concerne surtout l'atome ou des systèmes de particules quasi-isolées qui s'y apparentent, comme les plots quantiques (*quantum dots*), les centres NV (*Nitrogen Vacancy*), ou les dopants en matrice cristalline.

Le caractère quantique se dévoile notamment pour le photon unique ou en faible nombre, mais aussi lors de l'interaction photon-atome qui engendre l'intrication. Ces situations permettent de prouver par l'expérience les concepts de la mécanique quantique, certains d'entre eux, anciens, n'ayant trouvé de réalisation que très récemment, comme le chat de Schrödinger. Les avancées du domaine sont nombreuses, et reposent grandement sur le partenariat théorie-expérience pour définir des protocoles. Ces expériences de pointe ont non seulement bénéficié de progrès technologiques remarquables mais en ont engendré à leur tour : sources de photons uniques, de paires de photons, façonnage modal, propagation à longue distance, propagation guidée, détection en phase et en comptage de haute efficacité.

Bon nombre d'expériences amont utilisent néanmoins des faisceaux lumineux classiques à des fins très fondamentales pour valider et améliorer des processus qui sont la base des technologies quantiques : citons par exemple l'effet de la mesure, l'effet de la décohérence, les processus EIT (*Electromagnetically Induced Transparency*) ou CPO (*Coherent Population Oscillation*) réalisant des mémoires quantiques, les protocoles de restitution du

photon, la cryptographie quantique, la maîtrise du bruit quantique ou les fluides de lumière.

L'optique quantique a des retombées avec de la valeur ajoutée. Citons l'opto-mécanique qui a permis d'améliorer la sensibilité des détecteurs de VIRGO et la propagation du photon en milieu désordonné qui laisse entrevoir la possible imagerie en milieu turbide. Ces progrès d'optique quantique sont en lien étroit avec les avancées en optique (voir III).

Technologies quantiques. Cette thématique est apparue nationalement et internationalement suite à des progrès technologiques qui permettent d'aborder de nouveaux défis : la physique quantique à un stade ultime pour l'utiliser comme des technologies porteuses. Au niveau national elle est animée par le GDR IFQFA qui rassemble régulièrement les acteurs du domaine. Elle a récemment déclenché de grands investissements en Allemagne en Angleterre, aux USA et en Chine et a fait ressortir un besoin fédératif au niveau européen qui s'est traduit par la création du Quantum Flagship.

Les technologies quantiques concernent plusieurs thèmes et sous-thèmes de ce rapport (atomes froids, optique quantique, nano-objets, optique, nano- optique) et auraient pu être présentées en axe transversal. Le choix de positionnement en partie I correspond aux ressources principales de ce domaine, à savoir la physique quantique et l'optique quantique. Des ponts existent avec des domaines proches (photonique, nano-physique, nano-électronique, supraconducteurs, etc.) couverts aussi par les sections 02, 03, 05 ou 08.

Les technologies quantiques sont en général déclinées selon quatre rubriques :

- *Le calcul quantique* qui repose sur le principe de superposition d'états et qui étudie des protocoles, des algorithmes, des codes de correction, pour un calcul théoriquement plus efficace qu'avec les ordinateurs actuels.

- *La simulation quantique* qui réalise des systèmes quantiques et les mesure après évolution. Elle permet de comprendre des processus difficiles à prédire et à simuler par le calcul ;

- *Les communications quantiques* qui visent un codage inviolable et une communication sécurisée, basée sur la propagation de paires (ou davantage) d'objets quantiques intriqués. Toute intrusion – ou incident – sur l'un des objets lors de la propagation est alors détecté sur l'objet dual ;

- *Les capteurs quantiques* qui utilisent les objets quantiques (ondes de matière, centres NV, photons etc.) pour des mesures ultra-sensibles et à des échelles très petites pour le magnétisme, la gravité, le positionnement, etc.

Ces recherches examinées du point de vue très fondamental en section 04 sont en lien avec de réels développements et ont fait émerger des startups qui relaient les avancées du domaine vers le monde industriel.

II. Physico-chimie des molécules, agrégats et nanoparticules

La physique moléculaire apporte des informations structurales et dynamiques sur des espèces isolées ou environnées. Nous indiquons ici quelques avancées méthodologiques expérimentales et théoriques ayant permis au cours des dernières années un progrès des connaissances dans ce domaine et dans les disciplines aux interfaces : astrophysique, atmosphères, interfaces solide/gaz, biochimie en solution.

La spectroscopie moléculaire est une discipline de cœur de métier qui élargit sans cesse son périmètre au rythme des progrès méthodologiques et techniques et irrigue beaucoup d'applications dans des domaines très variés. Les ruptures technologiques concernent notamment les sources lumineuses, plus précises, couvrant une région spectrale étendue et donnant accès à de nouvelles informations quantitatives sur les milieux ou, plus qualitatifs

vement, sur des effets physiques encore peu explorés.

L'essor des lasers ultra-courts a conduit à une meilleure compréhension de la dynamique électronique et nucléaire des systèmes moléculaires. La diversité des longueurs d'onde et l'augmentation des taux de répétition permettent d'aller vers les problématiques fondamentales sur des systèmes modèles et sur des édifices moléculaires complexes impliqués dans les processus naturels. Ces connaissances structurales et dynamiques traitent de processus de plus en plus complexes aux interfaces des disciplines voisines et d'intérêt sociétal telles que la composition de l'air, les molécules d'intérêt pharmaceutique, la production et le stockage d'énergie ou d'information.

Spectroscopie d'édifices moléculaires

Les évolutions récentes en spectroscopie concernent divers domaines dans lesquels les équipes françaises jouent un rôle moteur au niveau international. L'extension des domaines spectraux a été permise par des sources synchrotron à très large gamme spectrale comme SOLEIL (*Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE*) ou XFEL (*X-ray Free-Electron Laser*) et dans le domaine THz (laser à cascade quantiques et mélanges optiques). Ces sources ont été accompagnées de développement des techniques à dérive de fréquence notamment dans le domaine millimétrique.

La précision accrue des mesures est particulièrement frappante pour les petites molécules. Elle résulte du développement des peignes de fréquences et de la distribution de références ultra-stables par réseau fibré. Elle permet des tests de physique fondamentale (voir D) mais aussi de quantifier les densités moléculaires des atmosphères ou du milieu interstellaire via une spectroscopie quantitative en intensité et en profil de raies.

La diversité des systèmes étudiés s'est vue largement étendue en particulier vers (i) des petits systèmes modèles présentant une forte complexité intrinsèque : mouvements de grande amplitude, multiples couplages d'états électroniques excités impliquant des intersections coniques ou portés à des températures élevées ; (ii) des espèces radicalaires ou réactives à faible durée de vie mais d'importance pour la chimie atmosphérique ou l'astrochimie ; (iii) des systèmes moléculaires comportant un très grand nombre de degrés de liberté vibrationnels ou électroniques : biomolécules, hydrocarbures poly-aromatiques, fullerènes, agrégats moléculaires, complexes métaux-ligands, nanoparticules...

En parallèle, il est à noter les forts développements des spectroscopies de dichroïsme circulaire vibrationnel ou de photoélectrons en phase gazeuse pour étudier finement la conformation de complexes isolés et chiraux comme des systèmes modèles de la reconnaissance moléculaire d'intérêt biologique et pharmacologique.

En outre, on assiste désormais à l'usage conjoint de diverses techniques de spectroscopie (IR, UV-visible, Auger, photoélectrons, photodissociation, imagerie...) sur un même dispositif, d'une variété de sources (jet de nano-gouttes, sources à condensation, piège ionique cryogénique) et de multiples techniques d'analyse (spectrométrie de masse, de mobilité ionique, dichroïsme circulaire, transfert résonnant d'énergie ou de charge entre donneur et accepteur...).

Au plus près des expériences, la modélisation a elle-aussi connu des progrès considérables. Elle a accru sa capacité à traiter des états ro-vibrationnels ou électroniques de plus en plus excités, développé des approches hamiltoniennes effectives pour un traitement quantique numériquement exact et y a inséré des approches explicitement dépendantes du temps. Les spectres caractérisant la dynamique électronique ou vibrationnelle sont désormais accessibles et interprétés pour des familles plus vastes de molécules, isolées ou en environnement contrôlé. La diffusion des codes aux non-spécialistes (notamment en chimie quantique)

et l'alimentation croissante des bases de données en sciences de l'univers contribuent aux avancées notables de la discipline.

Dynamiques électronique et nucléaire

L'émergence des sciences attosecondes constitue l'une des avancées récentes les plus remarquables. Ces techniques donnent accès à l'échelle de temps du mouvement des charges à l'échelle atomique et permettent d'appréhender la corrélation électronique, l'intrication quantique et la cohérence quantique, la mesure des temps de photo-ionisation ou de couplage électron-vibration, etc. L'observation en temps réel de la construction de résonances de Fano, les mesures de temps de photo-ionisation moléculaires, en particulier pour des molécules chirales, l'étude de la dynamique d'ions d'intérêt astrophysique figurent parmi les résultats marquants récents obtenus dans l'hexagone. Ces expériences en plein essor nécessitent des dispositifs très complets où les vitesses de tous les produits sont mesurées en coïncidence. L'expertise nationale dans le domaine profite ici de l'atout des grands instruments. Du point de vue théorique, cette évolution vers les sources attosecondes s'est accompagnée de développements méthodologiques capables de traiter de façon simultanée les dynamiques des électrons et des noyaux en s'affranchissant des grilles spatiales et des bases de fonctions usuelles tout en incorporant le grand nombre d'états électroniques impliqués dans de telles excitations ultra-brèves.

Le couplage à de nouvelles sources moléculaires variées (jets liquides, d'agrégats ou de nanoparticules, sources d'ions) a également permis l'ouverture à des problématiques en femto-chimie telles que la caractérisation de la dynamique de relaxation collective, l'étude de transferts d'électron, de proton ou encore d'hydrogène. Aux temps plus longs, les développements des techniques de jets par écoulement uniforme, de piégeage par confinement

électromagnétique (pièges multipolaires, anneaux de stockage) contribuent à l'élucidation des mécanismes de nucléation, d'isomérisation, d'évaporation voire même de relaxation radiative ou par fluorescence.

Ce domaine bénéficie lui aussi d'une forte synergie avec les théoriciens du problème à N corps quantique. Au cours des dernières années, un effort sans précédent a ainsi été mené pour combiner des méthodes issues de communautés différentes afin d'inclure les degrés de liberté électroniques dans la dynamique des noyaux, essentielle pour décrire les processus de relaxation consécutifs à une excitation électronique. Ainsi, parmi les approches permettant de décrire la dynamique des noyaux en temps réel, celles basées sur un traitement mixte classique-quantique comme les méthodes à sauts de surfaces ou les méthodes de propagation de paquets d'ondes telles que MCTDH (*MultiConfigurational Time-Dependent Hartree*) ont connu récemment une vaste diffusion. Dans le domaine des collisions atomiques et moléculaires, la résolution d'équations couplées a vu sa capacité prédictive fortement renforcée en particulier pour les régimes froids et ultra-froids.

En phase liquide, les approches de spectroscopie de cohérence et multidimensionnelles, notamment dans l'infrarouge, continuent à se développer en lien avec les progrès des sources. Originellement limitées aux couplages entre modes de vibrations, elles sont à présent étendues à l'UV pour l'étude des couplages électroniques. L'enjeu est d'aborder des systèmes intrinsèquement multi-échelles et hétérogènes en photochimie et photobiologie afin de comprendre les architectures moléculaires photo-actives de complexité croissante mettant en jeu une succession d'actes élémentaires à des échelles spatio-temporelles diverses (commutation de protéines fluorescentes, transfert de ligands dans les hémoprotéines, etc.). De nouvelles approches liées à l'interaction de molécules aux interfaces solides métalliques ou semi-conducteurs sont également apparues en lien avec la photo-catalyse, la plasmonique chimique ou le photovoltaïque. Les couplages

entre la chimie de synthèse, la physico-chimie et la spectroscopie ultrarapide y sont de plus en plus répandus.

L'étude théorique des molécules en interaction avec la phase condensée en présence d'effets quantiques s'est largement développée et permet désormais d'aborder de façon réaliste des processus comme la réactivité sur des surfaces, l'échange et la relaxation d'énergie entre différents degrés de liberté consécutivement à une excitation laser, une collision ou une ionisation. Les approches combinent dynamique quantique, classique, mixte traditionnelle mais aussi dissipative, ce qui permet d'étudier de grands nombres de degrés de liberté et d'intégrer le rôle des phonons ou le couplage avec les paires électron-trou ou les effets d'environnement d'un chromophore dans une molécule biologique ou d'une cellule photovoltaïque. L'environnement quantique extrême des nano-gouttes d'hélium superfluide ou des matrices d'hydrogène a également donné lieu à des développements théoriques importants, aussi bien pour les propriétés d'équilibre (formation de structures exotiques) que pour les processus dynamiques proprement dits (alignement non-adiabatique de molécules, dynamique photo-induite).

Physique moléculaire et interfaces

Les informations pouvant être recueillies en laboratoire sur des molécules ou édifices isolés s'avèrent de première importance dans divers domaines concernés par les milieux dilués, aux premiers rangs desquels on trouve l'astrophysique et la physico-chimie des atmosphères. La modélisation de ces environnements nécessite la connaissance de données précises et les missions spatiales récentes (Rosetta, Cassini-Huygens) ou prochaines comme JUICE (*JUpiter ICy moons Explorer*) du système solaire ainsi que les instruments ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) et bientôt JWST

(*James Webb Space Telescope*) y entretiennent une demande forte.

Au tout premier plan, la spectroscopie à haute résolution s'avère incontournable pour une grande variété d'applications astrophysiques allant de la détection de molécules organiques complexes dans le milieu interstellaire ou dans les comètes à la caractérisation des atmosphères (exo-)planétaires pour lesquelles la détermination des continua d'absorption reste à poursuivre. Il s'agit ensuite pour la phase diluée de déterminer les sections efficaces d'ionisation et de dissociation de molécules isolées, d'agrégats et de nanoparticules, d'identifier les produits de réactions et de mesurer les rapports de branchements et la cinétique. L'apport du rayonnement synchrotron et des collisions avec des ions est ici indiscutable. Les progrès en modélisation moléculaire permettent par ailleurs une confrontation avec les résultats en régime froid impliquant des effets quantiques spectaculaires. Une connaissance approfondie des processus état-à-état s'avère enfin nécessaire pour extraire les paramètres physiques (densité, température) essentiels à la connaissance des processus en jeu dans le milieu interstellaire.

Les applications à l'atmosphère terrestre, notamment liées au changement climatique, sont plus que jamais d'actualité et nécessitent une précision extrême sur les profils spectraux, expérimentalement mais aussi en termes de nouveaux modèles théoriques. Ces données sont cruciales pour nourrir les codes de transfert radiatif et pour l'étude de l'atmosphère par télé-détection. La physico-chimie des composés impliqués dans la formation de particules atmosphériques sub-microniques telles que les aérosols organiques secondaires est d'un intérêt croissant au vu de leurs effets reconnus sur la santé, la qualité de l'air et le climat. Leur meilleure compréhension passe par la caractérisation spectroscopique, l'étude des mécanismes de formation et de vieillissement, des cinétiques et de la réactivité en phase hétérogène.

Plus généralement, l'étude des interactions des molécules sur les surfaces reste un champ d'activité particulièrement actif dans ses composantes fondamentale, appliquée, et pour le contexte astrophysique. L'ingénierie des sur-

faces bénéficie désormais d'une grande variété de composés de synthèse, d'une maîtrise progressive des processus auto-organisés ou induits et des méthodes de suivi de croissance. Elle permet d'élaborer des systèmes hybrides, où l'objet d'étude interagit avec des nouveaux matériaux à 2 dimensions, des supports nanostructurés (réseaux de nanoparticules, réseaux de contraintes par épitaxie) ou des dispositifs dispersion, des couplages électroniques, excitoniques ou plasmoniques.

En sciences de l'univers, il est désormais établi que les processus se déroulant sur les surfaces sont essentiels à la formation de molécules organiques complexes dans les environnements froids dont le milieu interstellaire. L'étude des couches adsorbées sur les grains de poussière requiert, en lien avec les observations de la phase gazeuse, la détermination des barrières de désorption afin d'expliquer la richesse moléculaire observée. Les expériences de laboratoire sur des systèmes moléculaires condensés ont révélé la grande complexité des transformations dues à la concomitance de nombreux processus : changements de phase et morphologie de glace, recombinaisons de radicaux, désorption ou diffusion induites par la chimie ou la radiation, pulvérisation, etc. La quantification de ces processus, qui permettra de les intégrer dans des modèles astrophysiques de ces milieux, n'en est qu'à ses débuts. Alors que les mélanges de glaces et d'édifices hydrocarbonés sont intensivement étudiés pour imiter les systèmes astrophysiques réels, la modélisation numérique cherche à adapter à ces besoins spécifiques les méthodes de chimie quantique.

Enfin, la physico-chimie des systèmes moléculaires d'intérêt biologique continue à se développer par la caractérisation structurale et dynamique d'objets de plus en plus grands (protéines, brins d'ADN, biopolymères...) qui apportent des connaissances sur les changements d'états électroniques et de conformations à différentes échelles de temps et sur leur réactivité chimique intrinsèque. Les améliorations méthodologiques des sources, des diagnostics optiques et des modélisations profitent en particulier aux sciences analytiques.

III. Lasers, optique non linéaire, photonique et imageries

L'optique est un domaine qui couvre plusieurs sections du CoNRS et plusieurs instituts. En section 04 les thématiques sont recentrées sur les aspects fondamentaux ; c'est ainsi que cela apparaîtra dans ce qui suit. Un bon nombre d'équipes néanmoins les couplent à des technologies innovantes voire du sociétal ; on donnera quelques exemples.

L'optique contemporaine repose beaucoup sur les avancées des sources laser, constamment en évolution et en création depuis 50 ans pour aller vers plus de puissance, plus d'accordabilité, plus d'énergie par impulsion et davantage de modes de fonctionnement. Des avancées significatives réalisées ces dernières années auront des conséquences considérables à la fois sur la compréhension des processus fondamentaux au-delà du domaine de l'optique (turbulence optique, phénomènes extrêmes, ondes scélérates, phases topologiques) et sur les nouvelles technologies en télécommunications (fibres optiques), en imagerie (contrôle de front d'onde) ou en métrologie (précision des fréquences).

Le prix Nobel 2018 dont la thématique de recherche se rattache à la section 04 illustre à la fois l'importance de ces avancées mais aussi les retombées de l'optique (G. Mourou et D. Strickland pour leurs avancées sur les impulsions lasers ultracourtes, A. Ashkin pour ses travaux sur les pinces optiques).

Ces sources laser servent à de nombreux champs disciplinaires, dont certains donnés en partie I et II. Dans cette partie on présentera ceux qui ont trait principalement à l'optique : optique non linéaire, nano-optique, imagerie et bio-photonique.

Sources lasers

L'activité récente autour du développement de sources lasers toujours plus puissantes et compactes est extrêmement féconde, portée en cela par de plus en plus de champs applicatifs et interdisciplinaires : biologie, communications, physique des plasmas, environnement ou médecine et même en hydrodynamique, pour n'en citer que quelques-uns.

Outre les besoins en puissance moyenne, les recherches sur ces sources visent à augmenter la gamme spectrale accessible (du THz au VUV) et à étudier leur fonctionnement dans des régimes impulsionnels jusque-là réservés à certaines plages de longueurs d'onde. Ces nouvelles sources cohérentes à impulsions ultracourtes, avec des caractéristiques spatiales maîtrisées et de très faibles bruits (de phase ou d'intensité) se développent du VUV au moyen infrarouge.

Des études spectroscopiques approfondies sont consacrées à l'optimisation de nouveaux matériaux lasers, notamment des ions de terres rares et des métaux de transition dans divers types de matrices (cristaux, semi-conducteurs, verres massifs, guides d'ondes, fibres optiques conventionnelles ou micro-structurées). Le développement de nouveaux types de cristaux optiques non-linéaires et l'ingénierie de l'accord de phase ont permis notamment d'étendre les gammes spectrales accessibles sur des lasers monomodes compacts comme sur des chaînes laser de hautes énergies.

L'étude de sources THz utilisées notamment en imagerie connaît un intérêt croissant : ces sources de plus en plus performantes sont des lasers à cascade quantique, des dispositifs optoélectroniques basés sur des transitions inter-sous bandes, ou des dispositifs non-linéaires.

De nouvelles sources lasers dans le domaine visible, basées sur des cristaux dopés en terres-rares, des fibres à double gaine, ou des guides d'ondes constituent un sujet d'étude très porteur avec nombre d'applications à venir notamment en bio-photonique

ou encore pour la génération simplifiée de sources cohérente dans l'UV.

De nouvelles sources gagnent en maturité et permettent de reconsidérer certaines applications : lasers organiques accordables à capsules jetables, lasers pompés par LED à haute efficacité énergétique, lasers en guides d'onde femtosecondes ultra compacts, lasers bi-fréquences ultrastables permettant de transporter des informations codées sur porteuse optique ou même des lasers aléatoires reposant sur l'utilisation de milieux très désordonnés mais dont les modes spatiaux sont néanmoins finement contrôlés.

Le développement de sources délivrant des impulsions de l'ordre du cycle optique est également un sujet très dynamique. La conception de techniques de façonnage temporel et d'amplification en régime ultracourt est au cœur des préoccupations de la communauté. Elle s'accompagne d'une recherche de nouveaux matériaux amplificateurs afin d'étendre la gamme des longueurs d'onde depuis l'UV à l'IR, notamment pour la génération d'impulsions attosecondes. Atteindre de telles durées pose naturellement la question de la métrologie des impulsions produites ; des efforts importants pour développer des outils de caractérisation innovants sont donc requis.

Enfin, la phase de porteuse qui fixe l'évolution du champ électrique sous l'enveloppe de l'impulsion, est devenue un paramètre contrôlable. Il est ainsi possible aujourd'hui de réaliser des peignes de fréquences très robustes pour des mesures spectroscopiques rapides et de haute précision.

Dynamique non linéaire complexe en optique

L'optique non linéaire est intimement liée à la dynamique non linéaire en général. Les instabilités inhérentes aux systèmes non linéaires, efficacement décrites par celle-ci, ont permis la mise en évidence et la compréhension d'un

nombre considérable de phénomènes physiques qui aujourd'hui dépassent largement le seul domaine de l'optique non linéaire. Actuellement les systèmes optiques non linéaires offrent un moyen sans équivalent pour observer expérimentalement des phénomènes complexes apparaissant dans de nombreuses disciplines, largement étudiés mais très peu compris comme le chaos spatiotemporel, la turbulence ou plus récemment les ondes scélérates optiques.

Ces dernières désignent à l'origine des ondes de surface océaniques d'amplitude anormalement élevée. Ces « murs » d'eau dévastateurs sont de courte durée, et constituent l'une des manifestations fascinantes de la force de la nature. Elles apparaissent de nulle part et disparaissent sans laisser de trace. Ces vagues dévastatrices constituent donc un défi mondial majeur à résoudre en raison de l'augmentation incessante du trafic maritime. En particulier, l'étude de la propagation de rayonnement dans une fibre optique, où des effets fortement non linéaires sont obtenus, engendrant la génération d'ondes scélérates dans des super continus conduit à mener des parallèles fructueux avec l'hydrodynamique. Un apport considérable a été fourni par l'optique non linéaire dans la direction (qui doit être poursuivie) de la compréhension du mécanisme de formation de ces ondes extrêmes. Généralement, ces dernières apparaissent dans des champs chaotiques ou turbulents tels que la surface de l'océan, mais aussi les fibres optiques, les systèmes lasers, les condensats de Bose-Einstein et même dans le vide sous forme de fluctuations quantiques.

Les mesures optiques ultrarapides en temps réel aux échelles de temps picoseconde et sub-picoseconde sont essentielles dans de nombreux domaines scientifiques, comme la métrologie, la biologie ou l'optique non linéaire. En particulier, il existe un besoin urgent de développer de nouvelles techniques capables de mesurer des événements non répétitifs tels que les transitoires d'imagerie, les instabilités et les événements extrêmes, car ils ne peuvent pas être capturés par des techniques électroniques ultrarapides ou des

configurations de pompe-sonde optique. L'accès à ces événements nécessite plutôt des approches optiques ultrarapides en une seule prise, ce qui est l'objectif des techniques d'étiement temporel telles que la lentille temporelle et la microscopie temporelle. Bien que le principe de telles méthodologies soit connu depuis des décennies ce n'est qu'au cours des dernières années que des techniques expérimentales pratiques ont été développées, capables de réaliser le potentiel de caractérisation en temps réel en permettant des mesures d'amplitude et de phase de champs turbulents avec une grande précision.

L'observation et le contrôle de nouveaux phénomènes complexes deviennent aujourd'hui possibles grâce aux fibres optiques non linéaires microstructurées qui offrent des configurations inédites en régimes multimodes et multicœurs. Le rayonnement à la sortie de la fibre est alors contrôlé par l'ajustement du rayonnement à l'entrée à des degrés de précision jamais atteints auparavant.

Grace à la mise en œuvre de paquets d'ondes à polaritons cohérents dans une microcavité, les propriétés de superfluidité des polaritons ont été démontrées et observées expérimentalement. Ce résultat a ouvert la porte à l'étude des effets hydrodynamiques quantiques dans les polaritons, tels que la nucléation des solitons sombres et des tourbillons (vortex) quantifiés ou un nouveau type d'excitation non linéaire, appelé demi-soliton. Plus remarquable encore est l'émergence de régimes chaotiques voire turbulents dans ces mêmes fluides.

Un sujet qui est en plein essor, avec déjà des résultats remarquables concerne les propriétés topologiques de la lumière dans les réseaux optique et photonique. Il s'agit là de techniques reposant sur la mise en œuvre de réseaux de micro-piliers à géométrie bien contrôlée permettant d'étudier la physique topologique dans le domaine de la photonique.

Ces dernières années ont vu un renouveau dans le domaine des structures stationnaires ou propagatives de type solitons ou structures

localisées temporelles ou spatiales sous forme de solitons vectoriels ou multi-solitons. Ils sont générés par un couplage non linéaire ou par des effets de polarisation et leur dynamique complexe est également activement étudiée dans différents systèmes fortement dissipatifs : lasers à blocage de modes ou à semi-conducteurs, ou encore valves à cristaux liquides.

Nano-optique

La nano-optique bénéficie des avancées dans les nanomatériaux et la nano-structuration de surfaces. Sa démarche est de plus en plus multidisciplinaire, tant sur les concepts que les applications visées dans un contexte de forte miniaturisation.

Un axe très fécond en nano-optique est l'étude de nano-objets, isolés ou associés en nano-structures simples, avec l'objectif de comprendre et moduler leurs propriétés et l'influence de l'environnement, de les inclure au cœur de dispositifs optoélectroniques ou de les utiliser comme marqueurs ou sources locales de lumière. Un des objectifs est de réaliser dans le domaine de la physique du solide des dispositifs pour l'optique quantique, complémentaires à ceux de la physique atomique.

La réalisation de sources de photon unique reste un objectif qui mobilise les équipes de recherche dans le domaine de la nano-optique.

Les nano-diamants fluorescents contenant au moins un centre coloré du type NV sont disponibles avec des tailles réduites à quelques nanomètres. Leur grande photo-stabilité et la possibilité de préparer et lire optiquement leur spin ouvrent un vaste champ d'études : magnéto-métrie ultrasensible, marquage biologique, registres quantiques, plasmonique ou optomécanique.

Un enjeu important est de confiner le champ dans des cavités de structures photoniques contenant des nano-émetteurs afin de maximiser leur interaction. Les nano-structures diélectriques (cristaux photoniques, piliers,

nano-sphères) présentent l'avantage d'être peu absorbantes et de permettre un confinement important de la lumière. Des géométries innovantes de cristaux photoniques exploitant le ralentissement de la vitesse de groupe à proximité des bords de bande photonique, ou l'ingénierie du désordre ont permis d'augmenter le confinement. L'extraction de la lumière à partir de ces structures très confinantes reste un défi important.

Le fort confinement et l'ingénierie de l'extraction des photons offerts par les structures photoniques ont motivé le développement de sources lasers intégrables, la technologie planaire des cristaux photoniques permettant le guidage de la lumière et ainsi la réalisation de circuits optiques.

La possibilité d'exciter électriquement des plasmons sous pointe STM ouvre la voie à une plasmonique réellement nanométrique qui devrait être utile pour l'étude de la propagation d'information aux échelles ultimes.

Dans le contexte des forces lumière-matière, le contrôle de l'excitation des plasmons localisés a conduit à des nouvelles pinces optiques, dites « pinces plasmoniques », alors que les plasmons délocalisés peuvent être façonnés pour le transport et le tri de particules en environnement micro-fluidique.

La thermo-plasmonique permet aussi de stimuler à distance des nano-sources de chaleur, avec des applications en oncologie.

La plasmonique utilise désormais l'aluminium, le graphène pour un couplage efficace entre nano-électronique et nano-optique, ou encore des semi-conducteurs pour une plasmonique rapide, accordable dans le visible et moyen IR, et intégrable.

Imageries et bio-photonique

Dans le domaine de la bio-photonique, un des buts actuels est de faire le pont entre les échelles micrométriques et nanométriques afin de quantifier plus finement les phénomènes

biologiques. Pour cela les efforts ont porté ces dernières années sur l'amélioration de la résolution spatio-temporelle des méthodes d'imagerie et l'imagerie en profondeur. Avec des méthodes d'échelles très différentes on peut ainsi aller du suivi de la molécule unique à l'observation d'un embryon ou d'une partie d'organe. Les différentes microscopies de fluorescence super-résolues comme STORM (*Stochastic Optical Reconstruction Microscopy*), PALM (*PhotoActivated Localization Microscopy*) ou STED (*Stimulated Emission Depletion*), ont connu un grand essor; elles permettent désormais une résolution inférieure à la limite de diffraction. L'étape suivante sera une microscopie super-résolue *in vivo* et avec une vitesse d'acquisition élevée permettant d'observer en temps réel le vivant. La méthode SUSHI (*Shadow Imaging*) combinée au STED qui utilise un fluorophore diffusible dans l'espace extracellulaire est très prometteuse.

L'imagerie en profondeur repose sur d'autres approches, notamment des techniques à plusieurs photons. On peut citer la microscopie SPIM (*Selective Plane Illumination Microscopy*), dite à feuille de lumière, qui consiste en une série de plans lumineux détectés par une caméra judicieusement placée. L'imagerie en profondeur se heurte encore à la déformation du front d'onde et à la diffusion de la lumière, ce qui justifie des travaux dans ces domaines, à savoir l'optique adaptative, le filtrage, la modulation mais aussi l'étude de la propagation dans des milieux fortement diffusants et les méthodes matricielles associées pour la reconstruction.

A côté des microscopies de fluorescence, les microscopies basées sur l'optique non-linéaire se sont fortement développées. Elles exploitent la conversion de fréquences du milieu biologique lui-même pour du doublage ou triplement de fréquences, et sont des alternatives avantageuses non-invasives car ne nécessitant pas un marquage préalable du système étudié. Elles sont très bien adaptées aux milieux anisotropes comme les fibres de collagène ou les membranes intracellulaires ou plasmiques. La technique CARS (*Coherent anti-Stokes Raman Spectroscopy*), une autre

microscopie non-invasive qui repose sur l'usage cohérent de deux faisceaux laser d'excitation dits pompe-sonde, ne cesse de progresser; elle est particulièrement adaptée aux structures cellulaires enrichies en lipides comme les membranes et gouttelettes cytoplasmiques.

De plus en plus, les techniques précédemment citées sont combinées entre elles, répondant ainsi à un ensemble de questions en sciences du vivant. Il est indéniable qu'elles s'appuient aussi sur les progrès des sources laser, celles en impulsion par exemple, des fibres optiques, des caméras et des capacités de stockage et d'analyse des images.

Ce domaine à valeur ajoutée sociétale bénéficie non seulement des collaborations entre expérience et théorie mais aussi de l'interdisciplinarité. En témoigne le nombre de publications et brevets associant des chercheurs de la section 04 à des partenaires d'autres domaines ou d'autres organismes ainsi que le succès d'écoles thématiques, telles que MiFoBio (*Microscopie Fonctionnelle en Biologie*), Multi-maging (*Imaging in wave physics: multi-wave and large sensor networks*) ou WACO (*Waves in Complex media from theory to practice*).

Des GDR abordent désormais la propagation des ondes en milieu complexe, la conception de systèmes imageurs ou le traitement d'images. Ces développements pourront faire avancer par exemple les neurosciences, dans les domaines cliniques et diagnostiques.

IV. Plasmas chauds

La physique des plasmas chauds est étroitement liée au développement de grandes infrastructures comme ITER, LMJ-PETAL (*Laser Mégajoule - PÉtawatt Aquitaine Laser*), ELI (*Extreme Light Infrastructure*) ou APOLLON. Elles engendrent des questions de physique fondamentale sur l'interaction lumière-matière dans des régimes de champs extrêmement

intenses, sur le rôle du rayonnement émis dans le plasma, sur l'interaction entre plasma et parois, sur les instabilités et sur la turbulence.

Plasmas pour la production d'énergie

Filière magnétique. Le projet international ITER pour l'utilisation de la FCM (*Fusion par Confinement Magnétique*) comme source d'énergie alternative bas carbone a pour but le contrôle d'un plasma en combustion et la validation des solutions techniques pour la régénération du tritium dans les couvertures tritigènes d'un réacteur. Il suscite des recherches très diverses, souvent fondamentales.

Ces activités de recherche pluridisciplinaires sur la FCM sont coordonnées au niveau national par la FR-FCM (CNRS, CEA, INRIA, Ecole Polytechnique et une quarantaine d'universités, écoles et instituts), qui est structurée en thématiques, correspondant aux grands enjeux du programme sur la fusion.

La physique de la turbulence et de la dynamique non-linéaire, des processus atomiques, des surfaces est au cœur des deux premières missions de la feuille de route européenne : 1) optimiser les régimes d'opération en minimisant les pertes. Les points-clés sont la maîtrise des disruptions (pertes brutales de confinement, point faible du tokamak) et des scénarios stationnaires, l'alimentation du plasma en carburant, le pompage des cendres de réaction, et la maîtrise de la contamination par les impuretés érodées de la paroi ; 2) optimiser les paramètres du plasma et les matériaux de paroi pour supporter les forts flux de chaleur et de particules produits dans un plasma en combustion. Ce problème provient d'un trop bon confinement du plasma dans les zones périphériques, ce qui focalise l'énergie s'échappant du plasma sur une portion très localisée de la paroi.

L'étude de la physique des plasmas chauds confinés au centre des machines de FCM met

en jeu la stabilité MHD (*Magnéto-Hydro-Dynamique*) macroscopique de la décharge, les phénomènes de transport turbulent dégradant le confinement, et le transport d'impuretés vers le cœur du plasma, où elles rayonnent de l'énergie thermique. Dans ces plasmas peu collisionnels, les approches cinétiques jouent un rôle clé notamment pour modéliser la turbulence plasma, les particules suprathermiques engendrées par des systèmes de chauffage externes ou les particules alpha de fusion. Ceci se traduit par des approches hybrides cinétique/fluide pour l'effet des particules rapides sur la stabilité non linéaire MHD, et des approches gyrocinétiques (cinétique avec moyenne sur les girations des particules autour des lignes de champ magnétique) pour la turbulence.

L'étude du transport et de la turbulence dans les plasmas de bord se focalise sur l'étude de la compatibilité des décharges plasma avec la paroi matérielle, du point de vue du plasma. Il s'agit d'étudier les contraintes imposées par le plasma sur la paroi. Les enjeux scientifiques sont liés aux phénomènes de transport turbulent dans ces régions, ainsi que sur les instabilités MHD spécifiques aux régions périphériques du plasma confiné (*Edge Localized Modes*). Y interviennent les mécanismes de physique atomique et moléculaire qui permettent d'étaler la puissance sortant du plasma confiné sur une surface plus importante.

Les activités sur les interactions plasma-paroi, en lien avec la physique des surfaces et des matériaux, veulent répondre aux grandes questions concernant la tenue au flux de chaleur, l'érosion des matériaux par le plasma, ainsi qu'à leur interaction avec les isotopes de l'hydrogène et d'autres espèces présentes dans le plasma. La rétention du tritium (quantité de tritium piégée dans la paroi) est essentielle du point de vue de la sûreté nucléaire. Elle a conduit à remplacer le carbone des parois par du tungstène, ce qui a fortement impacté les études dans ce domaine. Les études multi-échelles (calculs DFT d'énergies de piégeages, modèles de cinétique de population de pièges) et basées sur des expériences de laboratoire se

sont fortement développées. Un autre aspect important des activités est lié aux modifications de la morphologie de surface induite par l'action de l'hélium sur le tungstène (nanobulles, nano-structures...).

Les activités de modélisation évoluent vers une intégration dans une hiérarchie de modèles de niveaux de fidélité croissants. Outre l'importance de pouvoir traiter le même problème avec des outils différents, intégrer des modèles extrêmement complexes dans les modèles réduits, possiblement en utilisant l'intelligence artificielle devient nécessaire. Il est également indispensable de maintenir un effort de validation poussé, s'appuyant sur des systèmes de mesure performants via des expériences dédiées.

Filière inertielle. En 2013, de réelles avancées dans la compréhension des mécanismes physiques qui préviennent l'obtention d'un gain significatif en attaque directe (instabilités paramétriques, absorption de l'énergie laser, conversion X, instabilités hydrodynamiques, etc.) ont été réalisées et des résultats ont démontré un chauffage significatif du combustible par les particules alpha, et donc une amorce du processus d'allumage.

L'attaque directe connaît, en parallèle, un regain d'intérêt dû au nouveau schéma d'allumage par choc, schéma alternatif d'allumage pour contourner les principaux obstacles de l'approche conventionnelle. Il repose sur la séparation des phases de compression et d'allumage et un dépôt d'énergie additionnel sur un temps très bref, dû à un choc fort. Ce schéma, qui semble réalisable avec les technologies laser actuelles, mobilise plusieurs équipes en France, en Europe et aux Etats-Unis afin de prouver sa faisabilité sur les installations NIF et LMJ-PETAL.

Une campagne dédiée à l'étude du schéma d'allumage par choc est en cours, avec une deuxième partie prévue ultérieurement qui pourra bénéficier de l'implantation de nouveaux diagnostics. Il s'agit de mesurer la propagation d'un choc fort dans un milieu pré-comprimé et préchauffé en présence ou non d'un flux important d'électrons suprather-

miques. Il est à noter que ces expériences ont été programmées grâce à des études préliminaires réalisées sur des installations laser « intermédiaires » en France, en Grande-Bretagne ou au Japon, où l'objectif final ne pouvait être atteint par manque d'énergie disponible.

L'ouverture à la communauté scientifique des installations LMJ-PETAL donne accès à des installations avec des performances bien supérieures à celles des installations disponibles auparavant, alliant les capacités expérimentales étendues du LMJ à un vaste champ d'expériences rendu possible par la haute puissance du faisceau PW. L'ALP (*Association Lasers et Plasmas*) assure l'accès de la communauté scientifique aux installations lasers de puissance LMJ-PETAL, et contribue au développement de la recherche auprès des grands lasers nationaux et internationaux. Ses actions sont en lien étroit avec les quatre GDR qui animent cette communauté scientifique.

La présence de forts champs magnétiques auto-générés dans les plasmas de FCI et la possibilité d'améliorer les performances des implosions en magnétisant les cibles ont relancé les activités de recherche expérimentales, théoriques et numériques sur les plasmas fortement magnétisés. Une expérience dédiée à l'étude de l'interaction entre champ magnétique et transport thermique dans les conditions de la FCI a permis de démontrer la reconnexion magnétique dans une configuration de plasma créé par laser ainsi que l'obtention de champs magnétiques beaucoup plus intenses (proches du kT) qu'avec des installations de plus basse énergie. Cela a également permis de sonder le phénomène de reconnexion magnétique dans un régime proche de celui des arches solaires.

Etats extrêmes de la matière et haute densité d'énergie

Depuis une vingtaine d'années, l'ILP (*Institut Laser Plasma*) coordonnait les recherches et développements liés aux lasers et plasmas.

L'ILP comprenait l'ALP qui gérait l'accès aux installations laser du CEA/DAM (LMJ-PETAL) et la FLP (*Fédération de Recherche Lasers et Plasmas*) qui animait la communauté. En 2018, ces activités se sont réorganisées en quatre GDR complémentaires - UP, LEPICE-HDE, APPEL (*Accélérateurs Plasma Pompés par Laser*) et ACO- CHOCOLAS (*Action Concertée pour l'Etude des Matériaux sous très grandes Vitesses de Déformations*), dans lesquels on retrouve les thèmes de la HDE (*Haute Densité d'Energie*) et de l'UHI (*Ultra-Haute Intensité*).

L'évolution des installations expérimentales est à l'origine de progrès significatifs en physique des HDE créés par laser et autres sources de rayonnements secondaires. La synergie provient notamment de l'ouverture du LMJ-PETAL à la communauté académique avec la réalisation des premières expériences, du X-FEL européen de Hambourg inauguré en 2017 avec une ligne dédiée aux expériences HDE permettant aux utilisateurs d'apporter des instruments et des outils de diagnostic, de l'ouverture future du HPLF (*High Power Laser Facility*) sur le site de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) de Grenoble, des deux premières campagnes prévues sur le laser APOLLON dans le mode de 1PW-20fs et des améliorations apportées aux installations déjà opérationnelles comme LULI2000.

Ces lasers de forte énergie permettent désormais de créer en laboratoire des conditions rencontrées dans l'univers (supernovæ, disques d'accrétion, jets, etc.) et de réaliser des études dynamiques. Une forte activité se développe autour des expériences d'hydrodynamique turbulente dans les plasmas HDE. Dans ce cadre, des progrès importants ont été faits avec des expériences d'instabilité hydrodynamique de type Rayleigh-Taylor dans le régime turbulent. Ces résultats sont importants dans le contexte de la FCI (*Fusion par Confinement Inertiel*) et pour l'astrophysique, et nécessitent d'être poursuivis sur une installation laser de la classe mégajoule.

Les installations XFEL ont ouvert un nouveau champ d'investigation pour la HDE, car couplées à des lasers énergétiques ou des

aimants pulsés. Elles vont permettre des études de la matière dans des conditions extrêmes de pression, température ou champ. De telles situations se rencontrent à l'intérieur des exo-planètes, en matière solide sous haute pression, ou dans les transitions de phases structurales de solides complexes en présence de champs magnétiques élevés.

Des unités impliquées dans les GDR LEPICE, ACO-CHOCOLAS et le GDRI XFEL-Science, vont installer, grâce à un financement par le CNRS, un VISAR (*Velocity Interferometer System for Any Reflector*) à double longueur d'onde et un spectromètre permettant d'effectuer des mesures XANES (*X-ray Absorption Near-Edge Structure*) sur la ligne HED de l'XFEL européen dans le cadre du projet «*Accessing microscopic and macroscopic electronic properties of matter under extreme conditions*».

Les sources de rayonnement secondaire sont quant à elles devenues pertinentes comme outils de diagnostic de la matière en condition extrême ou pour détecter des champs lors de l'interaction laser plasma. Citons la proton-radiographie qui utilise les protons générés sur les installations laser de classe TW et PW (LMJ-PETAL ou APOLLON par exemple). Ces protons sont extraits en face arrière d'une feuille attaquée par le laser ultra-intense. L'efficacité de la production de protons dépend de la conversion de l'énergie laser en électrons énergétiques lors de l'interaction des impulsions laser avec des plasmas très denses. En particulier, pour comprendre l'impact des surfaces structurées à l'interface laser-plasma sur l'efficacité de la conversion, des études expérimentales, théoriques et numériques ont été menées par plusieurs groupes en France.

Des lasers femto-seconde de puissance avec la technique *Chirped Pulse* Amplification permettent aujourd'hui de délivrer des intensités lumineuses gigantesques (10^{21} W/cm²), soit des champs électriques de l'ordre de 10^{13} V/m. Dans de telles conditions, le champ laser peut accélérer les particules chargées du plasma à des vitesses relativistes en quelques attosecondes. La physique UHI associée à ces

nouveaux régimes est ultra-relativiste, fortement non-linéaire et hors-équilibre. Son étude est particulièrement motivante d'un point de vue fondamental. Les lasers PW actuels capables de délivrer des intensités supérieures à 10^{22} W/cm² devraient permettre la création de conditions de champs extrêmes dans des plasmas relativistes autorisant l'observation d'effets d'électrodynamique quantique, comme la production de paires électron-positron par effet Breit-Wheeler.

Sources secondaires de particules et de rayonnement

L'accélération de particules suivant l'interaction d'un laser de haute intensité avec un gaz ou un solide suscite un intérêt grandissant. Avec la capacité d'accélération de dizaines à des centaines de GV/m, il est aujourd'hui possible de générer dans des plasmas de longueurs inférieures à 10 cm, des protons avec des charges importantes de dizaines de MeV ou des électrons de quelques GeV.

Ces sources de protons de faible émittance, qui ont un spectre large et une durée de quelques picosecondes, ont permis des applications dans le domaine médical, par exemple pour la mort cellulaire en radiothérapie. On étudie aujourd'hui les effets du fractionnement du débit de dose sur des cellules cancéreuses irradiées par protons accélérés par laser.

L'accélération d'électrons relativistes est un domaine très dynamique et compétitif. On note ces dernières d'années une transition vers une recherche plus technologique et un développement des accélérateurs pour les applications : les USA projettent la construction d'un accélérateur d'électrons de 10 GeV, la Chine et l'Allemagne investissent massivement dans ce domaine pour en prendre le leadership. Ces projets se construisent dans de grands centres et participent à la constitution d'une communauté de scientifiques experts de ces machines laser-plasma.

Des avancées sur le sillage laser pour l'accélération des électrons ont été réalisées, allant de la démonstration de nouvelles techniques d'injection d'électrons à l'augmentation de la charge accélérée. Un enjeu actuel est le contrôle de la qualité des faisceaux d'électrons obtenus et leur fiabilisation, avant de pouvoir passer à une montée en énergie des électrons ou à leur utilisation pour des applications.

Une voie prometteuse est l'accélération laser-plasma d'électrons à très haut taux de répétition. La récente réalisation d'une source d'électrons relativistes à 5 MeV à cadence du kilohertz a ouvert la voie. Elle a permis de sonder la dynamique structurale d'un échantillon de silicium à des temps courts. Ces travaux motivent aujourd'hui d'autres projets et attirent des industriels pour des applications en radiothérapie à haut débit de dose par exemple.

Des progrès ont également été réalisés sur les sources bêtatron issues de l'accélération laser-plasma. La source de rayons X aux propriétés singulières (brièvement, collimation et taille de source micrométrique) a récemment permis les premières expériences d'absorption X femtoseconde d'un échantillon de cuivre hors-équilibre.

La démonstration d'un premier FEL utilisant une source d'électrons laser-plasma déclenche une vive compétition et de forts investissements à l'international. Récemment, les premières études ont permis de mettre en place l'instrumentation nécessaire pour l'observation d'un gain FEL, les projets en cours envisagent d'aller au-delà, pour démontrer la faisabilité d'un FEL laser-plasma à longueur d'onde variable.

La recherche sur les sources de rayonnement XUV par génération d'harmoniques d'ordre élevé est un domaine en essor avec une concurrence internationale intense. Réalisée en phase gazeuse, elle vise à comprendre et contrôler la dynamique de rediffusion d'un électron par le cœur ionique en présence de champ intense. Elle ouvre des pistes vers de nouvelles spectroscopies. En milieu solide, la génération d'harmoniques vise la réalisation de

sources attosecondes compactes, qui seront adaptées pour la nano-plasmonique ou l'optoélectronique pétahertz.

Les sources lasers XUV par amplification d'harmoniques dans les plasma-laser sont aujourd'hui très performantes dans la gamme (8-40 nm). Les résultats récents ont montré que

ces sources intenses peuvent être d'excellente qualité optique et de polarisation contrôlée. Ces sources, même moins performantes que les XFEL, sont néanmoins une approche complémentaire et à moindre coût pour des expériences d'imagerie et d'optique non-linéaire en régime du mono-coup.

Annexe

Unités rattachées à la section 04

- CELIA : Centre Lasers intenses et Applications, Talence
- GSMA : Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique, Reims
- ICB : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, Dijon
- ILM : Institut Lumière Matière, Villeurbanne
- InPhyNi : Institut de Physique de Nice, Nice
- ISMO : Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, Orsay
- JEIP : Jeunes équipes de l'Institut de Physique du Collège de France, Paris
- LAC : Laboratoire Aimé Cotton, Orsay
- LCAR : Laboratoire Collisions, Agrégats, Réactivité, Toulouse
- LKB : Laboratoire Kastler-Brossel, Paris
- LOA : Laboratoire d'Optique Appliquée, Palaiseau
- LOB : Laboratoire d'Optique et Biosciences, Palaiseau
- LOMA : Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, Talence
- LP2N : Laboratoire Photonique, Numérique, Nanosciences, Talence
- LPL : Laboratoire de Physique des Lasers, Villetaneuse
- LPP : Laboratoire de Physique des Plasmas, Palaiseau
- LULI : Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, Palaiseau
- PhLAM : Physique des lasers, atomes et molécules, Villeneuve d'Asq
- PIIM : Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires, Marseille
- LIDYL : Laboratoire Interactions, Dynamiques et Lasers, Gif sur Yvette
- MajuLab, Singapour

GDR rattachés à la section 04 en secondaire

- APPEL : Accélérateurs Plasma Pompés par Laser (IN2P3)
- CHIRAFUN : Chiralité et multifonctionnalité (INC)
- COMPLEXE : Contrôle des ondes en milieu complexe (INP)

- HPERO : Pérovskites halogénées (INP)
- ImBio : Imagerie et microscopie en biologie (INSIS)
- MESO : Physique quantique mésoscopique (INP)
- MCM-2 : Magnétisme et Commutation Moléculaires (INC)
- NACRE : Nanocristaux dans les diélectriques pour l'électronique et pour l'optique
- NBODY : Problème quantique à N corps en chimie et physique (INP)
- Ondes (INSIS)
- Ondes gravitationnelles (IN2P3)
- Or-Nano : L'or nanométrique (INP)
- Plasmonique active (INC)
- RESANET : Réactions, Structure et Astrophysique Nucléaire : Expériences et Théories (IN2P3)
- REST : Rencontres de spectroscopie théorique (INP)
- RFCT : Réseau Français de Chimie Théorique (INC)
- SUIE (INSU)

Notes

(1) <http://bilansocial.dsi.cnrs.fr/>

(2) Livret global_FIM_CH 2017_SECTION

(3) https://inp.cnrs.fr/sites/institut_inp/files/download-file/GDR%20INP%202019.pdf

SECTION 05

MATIÈRE CONDENSÉE : ORGANISATION ET DYNAMIQUE

Composition de la section

Philippe CLAUDIN (président de section), Cécile LEDUC (secrétaire scientifique), François BAUDELET, Thomas BICKEL, Caroline BONAFOS, Simona COCCO, Thomas Walter CORNELIUS, François DEBONTRIDDER, Damien FAURIE, Valentina GIORDANO, Mathieu KOCIAK, Claire LEVELUT, Fabrice MORTESSAGNE, Pierre MULLER, Laurence NAVAILLES, Franck PARA, Evelyne PREVOTS, David RODNEY, A. Marco SAIITA, Sergei SKIPETROV, Hélène ZAPOLSKY.

Résumé

Nous donnons dans ce rapport un aperçu des questions actuelles traitées en section 05, sur la structure et la dynamique de la matière condensée. Elles concernent les propriétés de l'état solide, depuis les matériaux massifs jusqu'aux nano-objets et les surfaces ou interfaces, ainsi que la physique des systèmes complexes et biologiques. Nous soulignons la grande diversité et les évolutions des problématiques explorées, qui mobilisent des approches expérimentales et théoriques variées et qui bénéficient souvent d'une interdisciplinarité féconde. Cette diversité trouve son unité dans l'approche physique des problèmes, et en particulier à travers l'identification des processus sous-jacents et la compréhension des liens entre les différentes échelles spatio-temporelles associées.

Introduction

La section 05 regroupe environ 300 chercheurs dont les travaux abordent des aspects variés de la structure et la dynamique de la matière condensée. Pour en décrire la répartition des différentes thématiques à grands traits, on peut dire qu'environ $2/3$ s'intéressent aux propriétés de l'état solide, depuis les nano-objets jusqu'aux matériaux massifs, en passant par les surfaces et interfaces, cependant que le $1/3$ restant étudie la physique des systèmes complexes et biologiques.

Ce rapport de conjoncture a pour but de donner une image aussi fidèle que possible des questions actuelles abordées par les communautés formées par ces chercheurs, en tâchant de souligner les problématiques en

essor ou en recul. Il est structuré autour de quatre thématiques principales : (1) Structure et dynamique de l'état solide, (2) Physique des surfaces et nano-objets, (3) Matière molle et systèmes complexes et (4) Physique des systèmes biologiques, au sein desquelles on peut ranger l'essentiel des activités de la section. Cependant, afin de refléter également des aspects transverses ou transdisciplinaires importants, nous abordons dans les parties suivantes (5) l'utilisation des grandes infrastructures de recherches (synchrotrons et sources de neutrons) ainsi que des plateformes de microscopie électronique, (6) les développements théoriques et numériques, et (7) la propagation des ondes en milieux complexes. Enfin, dans la dernière partie (8), on présente une brève analyse des derniers concours de la 05, qui donne un éclairage sur les sujets et tendances actuels par le prisme des candidatures.

Une difficulté de cet exercice de conjoncture réside dans le choix de la résolution à laquelle on construit cette image. Sans tenir à ce que chaque chercheur de la section y trouve le passage qui lui correspond, nous avons tenté d'ajuster le texte pour le rendre accessible à l'ensemble de la communauté scientifique que représente la 05, ainsi que pour en faire une référence utile pour les instances où se discutent choix et politique scientifiques (instituts, conseils scientifiques, laboratoires, etc.). Enfin, pour une lecture minimaliste, nous en avons résumé quelques éléments saillants dans la conclusion.

I. Structure et dynamique de l'état solide

Une part de l'activité de recherche relevant de la Section 05 concerne la structure et la dynamique de l'état solide. Cette activité regroupe la caractérisation expérimentale, théorique et numérique des liens entre structure, et propriétés statiques et dynamiques

de systèmes allant de nanoparticules aux matériaux massifs. Les caractérisations expérimentales s'appuient sur des instruments disponibles à l'échelle d'un laboratoire (par exemple diffraction des rayons X, spectroscopies) ou au travers de groupements locaux (plateformes de microscopie), d'une part. L'exploration de la structure fine et de la dynamique microscopique de la matière a d'autre part motivé la construction de grands instruments à l'échelle nationale (sources de neutrons, de rayonnement synchrotron et laser à électrons libres). La modélisation quant à elle s'appuie sur des approches théoriques et numériques à différentes échelles de temps et d'espace : descriptions théoriques de la structure et dynamique de milieux désordonnés ou cristallins, modélisation à l'échelle de la structure électronique, calcul des structures stables, de la dynamique de réseau, des propriétés de transport, simulations par dynamique moléculaire, modèles Monte Carlo, champ de phases, mais aussi modèles mésoscopiques et continus des milieux cristallins et amorphes.

La communauté scientifique liée à cette thématique est très large, à cause à la fois du nombre important de classes de matériaux différents et de la diversité des propriétés à étudier. La communauté est ainsi organisée autour d'un nombre très important de réseaux, fédérations et GdR dont les tailles et fonctionnements peuvent varier. Pour n'en citer que quelques-uns, on retrouve plusieurs GdR et IRN : le GdR ModMat (pour les aspects de modélisation), le GdR Nanothermique, le GdR Meeticc (Matériaux, Etats ElecTroniques, Interactions et Couplages non-Conventionnels), et l'IRN Mecano, ainsi que les anciens GdR Thermoélectricité (aujourd'hui évolué en GIS) et Verres. On trouve aussi le réseau technologique des Hautes Pressions et, au niveau de la recherche sur Très Grands Instruments (TGI), la Fédération de Neutrons de France, l'Association Française des Utilisateurs de Rayonnement Synchrotron et le GDRI XFEL-Science.

Ces dernières années ont vu des avancées notables dans plusieurs domaines. Notamment, les approches de modélisation multi-

échelles ont beaucoup progressé et incorporent des informations allant de l'échelle électronique des liaisons atomiques aux calculs de structures, en passant par l'échelle mésoscopique des microstructures de défauts (dislocations dans les métaux, zones de cisaillement dans les verres). Les techniques expérimentales résolues en temps, comme les méthodes pompe-sonde par laser et rayons X ou la sonde atomique à laser ultra-bref, ont aussi beaucoup progressé et permettent d'accéder à des dynamiques en temps réel et des phénomènes ultrarapides comme des transitions de phase, des réactions chimiques, et l'effet de l'interaction lumière-matière.

Parmi les thèmes de recherche en plein essor, on peut citer l'émergence de l'intelligence artificielle comme outil d'optimisation du traitement de données à haut débit, avec des applications variées : développement de nouveaux alliages, de nouvelles architectures, de potentiels interatomiques réalistes, identifications de structures récurrentes dans les systèmes complexes comme les milieux amorphes. Les aspects de calcul intensif ont aussi très rapidement progressé avec une utilisation accrue des architectures GPU. Pour les aspects expérimentaux, il faut noter que les caractérisations s'appuient désormais de plus en plus souvent sur des techniques corrélatives qui consistent à combiner plusieurs techniques complémentaires, parfois au sein d'un même outil. Un exemple est la combinaison de microscopie électronique en transmission et à balayage, associées à la production d'échantillons par Focused Ion Beam (FIB) sous forme de microarchitectures (MEMS) optimisées permettant des observations *in situ* aux petites échelles. Aussi, l'association de la sonde atomique tomographique à de la microscopie électronique en transmission, ou de la microscopie ionique à effet de champ ou encore à de la spectroscopie de micro-photoluminescence permet d'extraire la structure chimique et électronique d'échantillons à 3 dimensions avec une résolution atomique. Les aspects de physique sous haute pression, notamment pour les verres, sont aussi en croissance rapide. Côté applications, les matériaux bio-inspirés se développent rapidement afin de concevoir

des matériaux plus miniaturisés, recyclables et économes en énergie. Ainsi, ont été développés de nouveaux matériaux mésoporeux, des matériaux oxydes hybrides et des nanocomposites obtenus pour certains par auto-assemblage de nanoparticules. Des matériaux nouveaux nanostructurés sont aussi développés dans le domaine de la production, reconversion et stockage de l'énergie. Cette thématique nouvelle nécessite le rapprochement de compétences variées, incluant la mécanique, la microfluidique, l'électronique et la chimie, afin d'optimiser de nouveaux matériaux multifonctionnels, avec – parfois – la coexistence de propriétés incompatibles au sein d'un seul matériau.

À l'inverse, plusieurs thématiques marquent un certain recul. Ainsi, la recherche en métallurgie s'est fortement orientée vers les systèmes de dimensions réduites (par ex. couches minces, micro- et nanopiliers) au détriment des études plus traditionnelles, mais encore nécessaires, d'élaboration et de caractérisation de matériaux massifs, comme les monocristaux. De même, de nouvelles méthodes de caractérisation sont apparues, comme la diffraction cohérente, mais les compétences dans les techniques plus traditionnelles, comme la microscopie électronique pour l'étude des structures, connaissent globalement un recul. Pour les verres, on note en outre un fort accroissement des études théoriques et une diminution concomitante des caractérisations expérimentales. Un autre point délicat, décrit dans la partie 6, qui affecte particulièrement l'étude de l'état solide est la fermeture du réacteur Orphée du Laboratoire Léon Brillouin, seule source française pour la diffraction neutronique.

Notons finalement que plusieurs activités actuellement en croissance rapide sont à l'intersection avec d'autres sections du CNRS. Ainsi, la fabrication additive qui permet de produire des architectures 3D complexes en polymères, céramiques ou métaux est une technique à l'intersection avec les sections 09 et 15 ouvrant un champ entier d'études pour l'optimisation des propriétés des matériaux architecturés. De même, l'approche biomimé-

tique de la science des matériaux ou la conception bio-inspirée de matériaux ont émergé récemment comme une stratégie globale faisant le lien avec les sections 11 et 15. Finalement, l'étude de nouveaux matériaux couplant plusieurs propriétés fonctionnelles voire mécaniques (transport de la chaleur et de l'électricité, résistance mécanique et transport/magnétisme ou propriétés catalytiques et optiques), fait appel aux compétences des communautés des sections 03 (transport électronique et magnétisme), 10 (transfert thermique) et 05, mais aussi 09 (mécanique) et 15 (synthèse chimique, catalyse).

II. Physique des surfaces et nano-objets

Une partie de l'activité relevant de la section 05 concerne la physique de la matière aux dimensions réduites incluant la physique des surfaces, la synthèse des nano-objets (2D, 1D et 0D) et l'étude tant théorique qu'expérimentale de leurs propriétés.

Les méthodes d'élaboration utilisées vont de la synthèse chimique (chimie colloïdale, chimie de surface) à l'épitaxie moléculaire en passant par l'implantation. Du point de vue instrumental, de nombreuses microscopies sont utilisées ou développées telles les microscopies optiques : microscopie à effet tunnel (STM), microscopie électronique à transmission (MET), sonde atomique tomographique (SAT). Celles-ci sont souvent couplées à des techniques macroscopiques (par opposition aux techniques résolues spatialement) de laboratoire (diffraction et spectroscopie de rayons X) ou relevant des grands instruments (synchrotrons, neutrons). De multiples avancées en microscopie ont été réalisées permettant par exemple de visualiser la croissance de nanostructures en temps réel et à l'échelle atomique et de mesurer les propriétés optiques de molécules uniques. Du point de vue théorique,

l'accent est mis sur l'étude de l'effet du confinement nanométrique sur les excitations élémentaires ou collectives (techniques *ab initio* adaptées aux forts effets excitoniques, analyse des interactions électrons-trous ou électrons-électrons dans les structures de basse dimensionnalité) et sur la description des mécanismes de croissance et stabilité des nanostructures.

Les études sur les surfaces et les interfaces constituent un domaine de recherche traditionnel de la section 05 renouvelé par le développement des nanosciences. D'importants progrès ont été réalisés dans le domaine des films moléculaires sur surface et en particulier des assemblages hétéromoléculaires pour créer des réseaux covalents. L'enjeu principal vise à dépasser les études de croissance et de caractérisation pour analyser les relations structures/propriétés depuis la molécule unique jusqu'à la monocouche. Plusieurs procédés de fonctionnalisation de surface ont ainsi été développés pour des applications diverses (électronique moléculaire, photovoltaïque hybride). L'étude des films ultra-minces est liée à la possibilité d'utiliser des mécanismes d'instabilité pour fabriquer des nanostructures. Du point de vue théorique, l'étude des conditions d'instabilité des films contraints élastiquement a progressé, les structures résultantes pouvant conduire à la fabrication de boîtes quantiques. Il en est de même de l'étude des mécanismes de démouillage à l'état solide qui peuvent maintenant être maîtrisés pour produire des distributions d'objets tridimensionnels contrôlées en taille et position et utilisables, par exemple comme diffuseurs de Mie. Les nouvelles recherches sur le mouvement spontané de particules sur une surface s'intéressent à l'origine des déplacements ainsi qu'à de potentielles applications basées sur la possibilité d'influencer voire de contrôler les forces motrices (effet Marangoni, électromigration, évaporation non congruente, gradient de mouillabilité, réactivité chimique locale) en structurant la surface ou en utilisant ses propriétés d'anisotropie.

Les études sur les nano-objets 1D, 2D ou 3D concernent essentiellement leur croissance et

l'analyse de leurs propriétés individuelles ou collectives. Au-delà des efforts pour obtenir des matériaux 2D analogues du graphène à base d'éléments du groupe IV (silicène, germanène, stanène, plombène) ou autres (hBN, BCN), apparaissent certaines études sur des oxydes 2D utilisables comme diélectriques ultimes en microélectronique. D'importantes avancées sur les systèmes 1D ont été effectuées grâce aux développements en MET qui ont rendu possible l'observation de la croissance *in situ* de nanofils semiconducteurs ou de nanotubes de carbone. On note aussi l'utilisation de nanotubes comme châssis pour l'insertion de molécules. Ces nanosondes multifonctionnelles (magnétique, optique, etc.) ont de nombreuses applications en biologie et médecine et posent également des questions fondamentales liées aux phénomènes de confinement. Il existe de nombreux cas où la croissance a lieu dans des milieux nano-confinés. C'est le cas des ciments, de certains biomatériaux ou encore de matériaux poreux complexes dans lesquels se posent des problèmes de transport liés à la topographie des pores. L'étude de la nucléation en milieu confiné permet de maîtriser les processus de germination pour mieux analyser les lois classiques de la nucléation et leur déviation. Enfin, si l'implantation et l'irradiation des nanomatériaux, activités historiques de la section 05, semblent marquer le pas, l'étude des phénomènes atomiques lors de l'implantation d'H ou d'He dans les semi-conducteurs ou dans les matériaux pour le nucléaire reste dynamique. Cette thématique peut être élargie à la synthèse ionique de nanoparticules en matrice, au contrôle de leur forme ou de leur dopage, et au bombardement ionique en incidence rasante pour la nanostructuration de surfaces, futurs gabarits pour l'auto-organisation de nanoparticules métalliques.

Un nombre important d'études porte sur les propriétés optiques de nano-objets tels que les molécules uniques, les points et puits quantiques, les matériaux 2D et les hétérostructures 2D. Les systèmes photoniques analysés concernent les particules plasmoniques, les métamatériaux et les métasurfaces pour localiser les champs électromagnétiques à l'échelle de

quelques nanomètres et contrôler certaines propriétés optiques. Le comportement mécanique et la plasticité des nano-objets (nanopiliers, nanofils, nano-îlots) métalliques et semi-conducteurs sont également étudiés afin, en particulier, de mieux comprendre la transition fragile/ductile des semi-conducteurs à petite échelle.

Cette activité possède un recouvrement avec différentes sections, notamment la section 03 pour l'étude des propriétés électronique et optique de nanostructures ou la section 11 pour la synthèse et l'auto-assemblage. L'augmentation du nombre de sujets relevant de la biophysique (imagerie, matière active) résulte du fait que la thématique « nano » a développé des outils et des nano-sondes spécifiques. La métallurgie et la mécanique sont partagées par la section 09, les mécanismes atomiques relevant davantage de la section 05.

L'ensemble des thématiques de la physique de la matière aux dimensions réduites de la section 05 se retrouve autour de plusieurs GdR (et IRN) de l'INP, et reflètent les deux grandes communautés, surface et nano, de ce thème : les matériaux nanométriques aux propriétés remarquables – Graphène and Co, Nanocristaux dans des Diélectriques pour l'Electronique et pour l'Optique (NACRE), l'or nanométrique (Or-nano), Mécaniques de nano-objets (Mecano), la croissance de nouveaux matériaux : Processus Ultimes en Epitaxie des Semiconducteurs (PULSE) ainsi que les nouvelles méthodes d'observation : Structure et dynamique des matériaux dans leur environnement « réel » (NanOperando).

III. Matière molle et systèmes complexes

La matière molle désigne l'étude d'objets dont les états ne sont pas aussi bien définis que pour les solides et liquides. Si les polymères et les cristaux liquides ont été historique-

ment parmi les premiers objets mous étudiés par les physiciens, on trouve aujourd'hui dans cette thématique les systèmes complexes et hors-équilibre (dissipatifs), tels que les verres, les colloïdes, les mousses, les gouttes, les suspensions, les gels, les granulaires, les films, les membranes, etc. La description de leur dynamique souvent requiert, pour faire le lien avec les propriétés de leurs constituants microscopiques, la combinaison de la physique statistique avec l'hydrodynamique et la mécanique du solide (élasticité, plasticité, frottement).

Ces dernières années, se sont particulièrement développées les études sur les systèmes actifs, dont les éléments possèdent une source d'énergie propre leur permettant par exemple de se mouvoir. De nombreuses configurations ont été explorées, à la fois de manière expérimentale et numérique, associées à des mécanismes de mobilité très divers (processus phorétiques, nage d'organismes vivants, propulsion motorisée) et à des tailles très variées (du mètre à la fraction de micron), montrant des propriétés d'organisation spatio-temporelle, d'interaction ou d'auto-assemblage remarquables. Dans le cas de particules au sein d'un fluide, cette « activité » peut se coupler à l'écoulement et engendrer une rétroaction sur le système, par exemple sur sa rhéologie. Le couplage entre solide et liquide est d'ailleurs un autre thème sur lequel ont été déclinées de nombreuses études, portant notamment sur des effets élasto-capillaires, de mouillage ou de séchage, conduisant à des mécanismes dynamiques originaux, à des phénomènes d'instabilité, ou de formation de motifs. De manière similaire, on note un intérêt croissant pour les objets anisotropes, voire élancés tels que les fibres, les fils, les plis et les coques, avec lesquels ont été mis en évidence des effets d'organisation spécifiques. Une autre tendance actuelle est la descente dans les échelles pour aller sonder des systèmes de plus en plus confinés (par des parois, ou bien au sein d'une interface ou d'un milieu poreux), et tester l'effet de ce confinement sur les interactions entre éléments, les changements de phases, les propriétés d'organisation ou d'écoulement. Enfin, les études sur matériaux plus traditionnels (par ex. cristaux liquides, granulaires) se renouvel-

lent aujourd'hui *via* des travaux à l'interface avec d'autres disciplines (biologie, géophysique), et au travers de problématiques plus appliquées pour lesquelles des paramètres supplémentaires doivent être explorés (par ex. effets de forme ou de surface des particules). Ces matériaux sont encore utilisés comme outils ou analogues pour des questions plus générales (dans le cas des systèmes actifs ou biologiques en particulier).

Avec sa manière de construire des questions de physique sur ou inspirées par des objets qui appartiennent à d'autres champs, la matière molle est par essence une science très interdisciplinaire. La communauté scientifique associée à cette branche de la physique est ainsi assez diverse et trouve son unité davantage dans les approches utilisées que les sujets abordés. Elle se rassemble au sein de plusieurs GdR (par exemple le GdR Liquides aux interfaces, le GdR Mécanique et Physique des systèmes complexes, le GdR Solliciter LA Matière Molle ou encore le GdR Biophysique et biomécanique des plantes). Le spectre des techniques expérimentales utilisées est également assez large, depuis les grands instruments (rayons X, neutrons) pour sonder les échelles les plus petites, jusqu'aux montages à l'instrumentation légère (les fameuses expériences « de coin de table ») pour tester de manière épurée un mécanisme spécifique. De manière similaire, les descriptions théoriques varient des prédictions quantitatives, issues de descriptions assez détaillées, jusqu'aux approches en loi d'échelles déduites de l'analyse dimensionnelle des processus physiques en jeu. Les simulations numériques sont aussi souvent développées pour étudier, à partir de règles simples sur les constituants microscopiques, l'émergence de propriétés à plus grande échelle. Cette approche des problèmes confère ainsi aux chercheurs en matière molle la capacité d'être mobiles et réactifs vis-à-vis des sujets émergents. Enfin, le fait que nombre de ses sujets portent sur des objets macroscopiques, ou bien sont en lien avec des phénomènes du quotidien dont le grand public peut se saisir assez facilement, la matière molle se prête bien à la vulgarisation scientifique.

Cette interdisciplinarité met de fait la matière molle à cheval sur plusieurs sections et instituts du CNRS, et dans ce domaine les interfaces de la 05 avec les autres sections sont nombreuses et assez larges. Les aspects les plus physico-chimiques se traitent principalement en section 11 ; les problématiques impliquant la mécanique du solide ou des fluides sont également abordées en 09 et 10. Enfin, au sein même de la section 05, la séparation entre matières molle et dure n'est pas si tranchée : les études portant sur la physique des ondes peuvent concerner à la fois des objets mous et des matériaux plus traditionnels ; certains aspects de la plasticité en métallurgie physique ont leur pendant pour les écoulements de certains fluides complexes ; les effets de confinements mentionnés plus haut font écho à la physique des nanomatériaux et des surfaces. Pour finir, certaines questions abordées en matière active se connectent fortement avec la biophysique des cellules, des tissus ou des bactéries.

IV. Physique des systèmes biologiques

La physique des systèmes biologiques est une thématique en pleine expansion au sein de la section 05. Dépassant progressivement le développement instrumental appliqué à la structure de protéines, membranes ou de molécules d'ADN, les physiciens se sont appropriés les objets biologiques au point d'être aujourd'hui en mesure d'aborder et construire des problématiques physiques essentielles à la compréhension de mécanismes clés de la biologie, créant ainsi une nouvelle génération de chercheurs interdisciplinaires. Signe d'une grande vitalité, les sujets abordés s'ouvrent à l'ensemble des domaines des sciences du vivant : biologie structurale, immunologie, biologie cellulaire et du développement, cancérologie, neurologie, microbiologie, etc. Dans la diversité de ces thèmes, l'unité réside dans la façon d'aborder

les problèmes avec notamment une approche réductionniste, où la quantification des effets, le contrôle des paramètres et la modélisation théorique jouent un rôle primordial.

Un des enjeux majeurs actuels de la discipline est de faire le lien entre les différentes échelles : c'est en effet l'interaction entre constituants à l'échelle moléculaire (sub-nanométrique) qui détermine les propriétés des assemblages moléculaires (~ 10 nm) jusqu'aux propriétés des cellules (~ 10 μ m) et des tissus (~ 1 mm). En outre, le comportement des matériaux biologiques complexes ne résulte pas de la simple juxtaposition des propriétés des constituants individuels, et les phénomènes à l'échelle moléculaire n'expliquent pas directement ce qui se passe à l'échelle d'une ou plusieurs cellules, où des effets collectifs entrent en jeu. Les physiciens sont bien armés pour comprendre les propriétés multi-échelles émergentes des systèmes biologiques, notamment grâce aux outils de la physique statistique et de la mécanique des fluides. De plus, avec le développement des techniques de mesure des systèmes biologiques à haut débit qui a entraîné l'accumulation massive de données, de nombreux théoriciens s'attellent également à développer de nouveaux outils d'analyses fondés sur des techniques d'inférence et d'intelligence artificielle, en collaboration avec les bioinformaticiens.

D'un point de vue expérimental, une thématique qui a pris beaucoup d'ampleur ces derniers temps est l'étude du lien entre mécanique cellulaire et signalisation (c'est-à-dire les réactions chimiques responsables de la communication intra-cellulaire), domaine appelé mécanotransduction. Le but est de pouvoir mesurer ou appliquer des forces *in situ* (dans des bactéries, cellules ou organismes) avec une précision moléculaire, et les associées à des mesures meso ou macroscopiques, de façon à faire ce lien multi-échelles. Le développement d'outils de micromanipulation et de manipulation d'activités moléculaires par la lumière (optogénétique, biosenseurs fluorescents) a permis de faire de grandes avancées dans cette direction. Plus généralement, les études de mécanobiologie et de mouvements collec-

tifs (cellulaires, tissulaires, embryogénèse, biofilms, plantes, etc.) sont en plein essor et bénéficient d'avancées technologiques récentes en termes de micro- et nano-fabrication et en microfluidique. Une autre thématique forte, en France et surtout au niveau international (par exemple avec l'initiative européenne « Synthetic Cell »), concerne la construction d'une cellule artificielle à partir de constituants reconstitués *in vitro* (par ex. membrane et cytosquelette). Enfin, on peut également noter le fort développement des méthodes d'ingénierie tissulaire issues, pour certaines, de recherches en science des matériaux. Ces méthodes suscitent un vif intérêt étant donné l'ampleur et l'importance des applications médicales sous-jacentes.

La communauté des chercheurs travaillant sur ces sujets est large et répartie au sein de structures variées. Seul GdR rattaché principalement à l'INP et la section 05, le GdR Physique de la cellule au tissu (CellTiss) a pris fin en 2018. Gérés par l'INSIS, on peut noter les GdR Biophysique et biomécanique des plantes (PhyP) et GdR Micro et nanofluidique, qui recouvrent une partie des thématiques présentes à la section 05. Rattachés à l'INP mais pas à la section 05, le GdR ADN est dédié à l'architecture et la dynamique du noyau cellulaire, et le GdR Implémentations matérielles du calcul naturel (BioComp) est centré sur la réalisation de matériaux bio-inspirés. Bien que non rattaché à la 05 et l'INP, le GdR Mécanique des matériaux et fluides biologiques (MecaBio), qui a pour but de fédérer les domaines de la mécanique des fluides et des matériaux biologiques au sein d'INSIS et l'INSB, regroupe plusieurs laboratoires (LIPHY, CINAM, Inst. Langevin, etc.) et équipes qui relèvent de la section 05. De la même façon, le GdR Imagerie et microscopie en biologie (IMABIO) fédère des équipes de disciplines différentes, dont plusieurs appartiennent à la 05, autour des aspects liés à la microscopie du vivant.

La physique des systèmes biologiques a bien-sûr des recouvrements avec les autres thématiques de la section 05. La synthèse et la compréhension des propriétés des nano-objets sont importantes pour le développe-

ment de sondes nanométriques fonctionnalisées et biocompatibles. L'utilisation des matériaux biologiques comme substrats et le développement de matériaux bio-inspirés pour des recherches en matière condensée sont en plein essor. Enfin, certaines activités de la matière molle (fluides complexes, matière active) se recourent avec l'étude de la dynamique de systèmes biologiques que ce soit à l'échelle du biopolymère, des cellules (bactéries, nageurs) ou, à plus grande échelle, sur des animaux ou des plantes.

Ces thématiques de physique des systèmes biologiques sont également traitées en section 11, et la frontière entre les deux sections sur ces sujets n'est pas toujours bien définie. Par ailleurs, en fonction du domaine de spécialité de la biologie qui est ciblé, les recherches faites en 05 peuvent se recouper avec celles des différentes sections de l'INSB, en particulier la 22 (biologie cellulaire et développement) pour les aspects de mécanobiologie. Les thématiques connexes de biomécanique sont représentées en sections 09 et 10, avec l'étude de la mécanique des biomatériaux, la bioingénierie et les écoulements de fluides biologiques. Les projets pour lesquels le développement expérimental (par exemple systèmes « on chip », imagerie) est une composante importante, font le lien avec la section 8 et l'INSIS. Enfin, deux sections interdisciplinaires auxquelles contribue en partie l'INP, la CID 51 pour les aspects théoriques et la CID 54 pour les aspects expérimentaux, rassemblent évidemment différentes approches dans ce domaine. Cette diversité et le très fort développement, tant fondamental qu'appliqué, de ces thématiques, posent naturellement la question de l'opportunité de la création d'une nouvelle section de « biophysique » à part entière. La réponse n'est cependant pas évidente, car il est certain qu'une des forces de ces recherches est précisément leur développement au sein de la physique et la mécanique, qui leur impriment leurs approches. En outre, il faut garder en tête que les thématiques à l'interface physique-biologie mobilisent un spectre large de compétences et connaissances qui souvent impliquent un travail en équipe avec des chercheurs de disciplines différentes. Le degré d'implication des

chercheurs physiciens dans la discipline « biologie » est ainsi extrêmement variable et tous ne sont pas prêts à quitter leur discipline d'origine.

V. Grands instruments et plateformes

Les très grandes infrastructures de recherche (TGIR) et les infrastructures de recherche (IR) traditionnellement liées aux thématiques de la section 05 comprennent les synchrotrons et les sources de neutrons et dans une moindre mesure les sources d'ions lourds et les champs intenses. D'autre part, avec l'augmentation constante des coûts des équipements et des contrats de maintenance, une tendance actuelle est de fédérer et rationaliser l'achat et l'accès aux microscopes électroniques (TEM) que cela soit au niveau local ou au niveau national. On peut citer par exemple le réseau national METSA, qui regroupe en sus l'accès à des équipements de sonde atomique, ou le réseau ESTEEM à l'échelle européenne.

Une grande part des champs thématiques scientifiques de la section 05 fait appel à ces instruments, pour leur capacité à fournir des informations essentielles. Ils se montrent pertinents dans des sujets intéressant la matière molle, la métallurgie physique, les nanosciences, le magnétisme, les matériaux fonctionnels, les semi-conducteurs, les surfaces et interfaces, pour n'en citer que quelques-uns. Ces instruments sont d'ailleurs impliqués dans de nombreux GdR, couvrant le champ large de la section 05 : NanOperando, IMABIO, SYMBIOSE, SCINEE, MEETICC, UP, PULSE, et Médyna. La communauté se regroupe également au sein de la Fédération de Neutrons de France, l'Association Française des Utilisateurs de Rayonnement Synchrotron et le GdRI XFEL-Science.

Ces infrastructures de recherche reposent sur un investissement humain conséquent en termes d'accueil, ce qui n'est pas toujours facile

à faire reconnaître, et sur un développement continu des méthodes et techniques, avec ces dernières années la montée en puissance de nombre d'entre elles, telles que les méthodes d'imagerie fondées sur la reconstruction de phase (pychto-graphie) ou les expériences mettant en jeu des processus ultra-rapides. Ces développements sont d'une importance cruciale et doivent être reconnus à leur juste valeur. Leur évaluation, et notamment lors des recrutements et des promotions, est d'ailleurs difficile car les retombées de ces développements sont essentiellement collectives et se manifestent dans la durée. Par ailleurs, un fait notable est la forte convergence des techniques et méthodes d'imagerie et de spectroscopie dans le domaine des synchrotrons et des TEM, ce qui induit des efforts louables de rapprochement entre les deux communautés. Ces instruments sont usuellement combinés à des environnements permettant de varier les conditions thermodynamiques dans de très larges plages. On peut citer en particulier le développement des techniques résolues en temps, la généralisation des techniques d'observation d'échantillons étudiés dans des environnements variés (liquide, gazeux), sujets à des contraintes extérieures (tensions électriques, contraintes mécaniques) afin de se rapprocher des conditions réelles de systèmes complexes.

On note également pour l'ensemble de ces infrastructures un accroissement très important de la quantité de données acquises. Ceci induit des besoins similaires, mais non fédérés, en termes de transfert et stockage de données. Surtout, l'analyse de ces données est devenu un champ de recherche à part entière avec des développements théoriques récents (tel que l'application de l'apprentissage automatique) qui devra correctement être prise en compte par les sections dans le futur.

Si l'on entre dans les détails de l'utilisation des TGIR, deux sources nationales de rayonnement synchrotrons et de neutrons apparaissent majoritairement en section 05 : le synchrotron de troisième génération SOLEIL et le réacteur ORPHEE de même que deux TGIR européens : l'ESRF, synchrotron de troisième génération,

bénéficiant en 2019 d'une mise à niveau importante, et le réacteur Institut Laue-Langevin (ILL). On note également une participation au XFEL européen de Hambourg qui vient de démarrer.

VI. Développements théoriques et numériques

La recherche théorique constitue une partie importante des activités menées par les chercheurs de la section 05. Les activités de modélisation occupent néanmoins une place variable selon les sous-thématiques de la section. On peut en effet distinguer des approches analytiques, semi-analytiques ou des simulations numériques qui ne demandent pas une puissance de calcul très importante, et des approches purement numériques qui visent à modéliser de la façon la plus réaliste possible des systèmes complexes. Ces dernières font appel à des méthodes et des algorithmes sophistiqués, dont le développement constitue en soi une tâche scientifique non triviale. Elles sont caractéristiques de la physique du solide et des modélisations les plus microscopiques, mais c'est également un point de vue adopté aujourd'hui par une partie des biophysiciens théoriciens, notamment pour décrire des processus cellulaires. Les approches (semi-) analytiques et simulations légères sont plutôt associées aux grandes échelles spatio-temporelles, et sont typiques des modélisations en matière molle.

En général, la modélisation des systèmes complexes en matière molle et biologie passe par l'identification des mécanismes à l'œuvre dans le problème considéré, et dont on peut tirer des lois simples (comme des lois d'échelles) reliant les observables aux paramètres de contrôle. Ces mécanismes sont typiquement analysés au sein de simulations numériques dédiées qui n'ont pas vocation à décrire toute la complexité du système. Ces dernières

années ont été notamment abordés des problèmes d'écoulements dans les fluides complexes ou biologiques (description des gels actifs, rhéologie des suspensions granulaires ou sanguines), des phénomènes stochastiques ou hors d'équilibre (problèmes de premier passage et de recherche d'une cible, problèmes d'optimisation appliqués aux systèmes biologiques), ainsi que des études sur les systèmes autopropulsés (micro-nageurs, dynamique de foules). Ces analyses (semi-) analytiques se prêtent particulièrement bien à une compréhension multi-échelles des phénomènes (frottement solide et fluide, mécanismes géophysiques).

Les calculs et méthodes numériques utilisés pour s'attaquer aux problèmes de la physique du solide et de la science des matériaux couvrent des échelles différentes. Une partie importante de cette communauté s'intéresse à l'échelle atomique, qui permet une description «bottom-up» à travers la description explicite des atomes. Ces approches sont traditionnellement regroupées dans les familles de simulations «*ab initio*» et «classiques», où la distinction est sur la prise en compte explicite des degrés de liberté électroniques ou bien de leur modélisation empirique. Les résultats trouvent des applications dans les études des propriétés structurales, thermodynamiques, dynamiques, vibrationnelles, mécaniques des matériaux complexes (cristaux massifs, systèmes à dimensionnalité réduite, hétérostructures, nanostructures, verres, amorphes, liquides). Ces méthodes permettent également d'accéder aux propriétés électroniques, aux interactions électron-phonon, et aux effets excitoniques dans les semi-conducteurs.

Diverses approches sont employées pour les calculs *ab initio*: la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) et sa variante dépendante du temps (TDDFT), la théorie dynamique du champ moyen (DMFT), la théorie de perturbation à N corps (MBPT), les approches «fonctions de Green» (GW). Les chercheurs de la section 05 participent également au développement des algorithmes et des codes de calcul (par exemple, *Quantum Espresso* ou *Abinit*). A un niveau de description

moins approfondie, on trouve les méthodes type simulations atomistiques Monte-Carlo, dynamique moléculaire, etc., plus adaptées à décrire les systèmes désordonnés, les défauts, les surfaces et interfaces.

Une tendance forte au niveau international, et qui commence à prendre de l'ampleur en France également, est celle de combiner les avantages de ces deux échelles par l'utilisation de méthodes « machine learning ». Ces approches consistent en l'utilisation de trajectoires *ab initio* comme « données à exploiter », pour ajuster des potentiels d'interaction capables de retenir le niveau quantique des données d'origines, mais de l'utiliser sur des systèmes plus grands et sur des durées plus importantes. Cette tendance à intégrer les différentes échelles ne se développe pas uniquement entre le niveau électronique (*ab initio*) et le niveau atomique (simulations classiques), mais aussi entre les approches atomistiques et les échelles supérieures, vers le mésoscopique et le macroscopique (typiquement au-delà du micron), ce qui est généralement indiquée par la locution « modélisation multi-échelles des matériaux ». Ces dernières années ont vu l'émergence notamment d'approches dites « enhanced sampling » (par exemple, la métadynamique), pour traiter par exemple les transformations dans les matériaux aux échelles de temps supérieures à celles couvertes par les simulations *ab initio* ou classiques, ainsi que le développement d'approches « Monte-Carlo cinétique » et « champs de phase » pour les échelles supérieures.

Ces méthodes numériques sont discutées en particulier au sein du GdR MODMAT, qui fédère un nombre important de théoriciens et numériciens de la section. Cette communauté est également structurée au sein des GdR REST et NBODY, en lien avec les chercheurs des sections 03 et 13 travaillant dans différents domaines des propriétés électroniques (chimie quantique, physique de la matière condensée, physique nucléaire, mathématiques). Dans le domaine de la matière molle, les aspects méthodologiques sont moins marqués, et les théoriciens – en partie également expérimentateurs ou très proches des expériences – restent attachés à leur communauté

thématique *via* les GdR dédiés. Enfin, de par le large spectre thématique de la section 02, il existe un fort recouvrement avec les questions théoriques abordées par les chercheurs de la section 05.

VII. Propagation des ondes en milieux complexes

Les processus ondulatoires sont importants dans plusieurs champs d'expertise de la 05 car ils décrivent la propagation d'électrons, de phonons, et de photons. L'étude des phénomènes communs à tous ces types d'ondes dans des environnements complexes (désordre, symétrie brisée, etc.) fait partie du périmètre de la section. Ce sujet est interdisciplinaire par sa nature et dépasse le cadre de la matière condensée au sens strict en faisant un lien entre des domaines de la physique aussi éloignés que la géophysique, l'acoustique, la physique des micro-ondes, la photonique, et la physique des atomes froids.

Si la thématique de la propagation des ondes en milieux complexes tient son impulsion initiale de la physique de la matière condensée, elle a formidablement crû, s'est ramifiée et recouvre maintenant des domaines très autonomes. On peut par exemple relever le dynamisme actuel du développement des méthodes de contrôle et d'imagerie des ondes en milieux complexes. Toutefois, les activités qui demeurent dans le giron de la section 05 concernent essentiellement les phénomènes ondulatoires ayant des analogues en matière condensée, ce qui constitue leur spécificité par rapport aux recherches sur les ondes menées au sein d'autres sections du CoNRS (notamment la section 04) et instituts du CNRS (par exemple l'INSIS).

Un exemple, forcément partiel mais représentatif d'un sujet de recherche d'actualité est à puiser dans la quête toujours vivace d'une compréhension complète du phénomène de

«localisation d'Anderson». Son observation dans les systèmes de différentes dimensionnalités, sa description théorique et ses applications potentielles alimentent une très riche activité de recherche. Une autre direction de recherche en pleine expansion est l'étude des phénomènes topologiques en physique des ondes. Les ondes classiques permettent de modéliser des phénomènes physiques ayant lieu dans des matériaux d'intérêt contemporain (notamment les nouveaux matériaux bidimensionnels dont le graphène est le paradigme) à même d'atteindre des régimes qui ne sont pas réalisables dans le matériau modélisé. De plus, beaucoup de phénomènes quantiques trouvent des analogues ondulatoires et peuvent ainsi être étudiés à température ambiante et avec des échantillons de taille «humaine». Ces études sont très prometteuses en vue d'applications possibles dans des technologies de futur, notamment dans le contexte de l'information quantique.

Ainsi, l'avenir de cette thématique au sein de la section 05 se dessine dans la préservation de son esprit interdisciplinaire et de son ouverture vers différents domaines de la physique. Cette démarche scientifique a été et continue à être portée par plusieurs GdRs (dont l'actuel GdR COMPLEXE), dans l'animation desquelles les chercheurs de la section 05 jouent un rôle important.

VIII. Analyse des concours : évolutions thématiques et sociologiques

Pour finir, on présente dans cette partie une analyse succincte des concours des trois dernières années (l'analyse complète et quantitative fera l'objet du rapport de mandature, en 2021), afin d'illustrer les thématiques actuelles portées par les candidats. Ces données permettent également de discuter les questions de parité et d'interdisciplinarité.

Le recrutement CR en section 05 est un concours difficile, avec une forte pression au niveau des candidatures : entre 120 et 130 jeunes chercheurs se sont présentés pour un nombre de postes ouverts qui est passé de 6 à 4 entre 2017 et 2019. La proportion de candidates a été légèrement au-dessous du quart, et une à deux femmes ont été effectivement admises chaque année. Pour le concours DR2, c'est une cinquantaine de candidats qui se sont présentés chaque année, pour 6 postes. Là encore, la proportion de candidates a été de l'ordre du quart, mais celle des chargées de recherche ayant l'ancienneté pour être 'promouvables' est plutôt de l'ordre du tiers, et c'est dans les faits deux à trois femmes qui ont été retenues chaque année par le comité. Ces taux, qui sont sans aucun doute encore trop faibles, sont cependant parmi les meilleurs en physique, et ne semblent pas particulièrement associés aux sous-thématiques de matière molle et biologie, traditionnellement plus mixtes.

La question de la parité est un sujet important, auquel la section 05 est très attachée. De nombreux biais de genre persistent, par exemple la sous-représentation des femmes parmi les orateurs invités aux conférences ou bien au sein de comités de direction, éditoriaux ou d'instances organisationnelles, réduisant une forme de visibilité pour les chercheuses. Nous accordons à ces biais une attention particulière lors de l'examen des dossiers d'évaluation ou d'avancement, afin de permettre une comparaison des candidatures plus équitable. La tendance à l'autocensure est un autre aspect toujours actuel des candidatures féminines, avec seulement entre 10 et 20% de candidates à la promotion DR1. Le constat pour le passage DRCE est le même – fondé sur des échantillons plus petits, qui ne permettent pas d'avancer des nombres très fiables.

Les projets présentés par les candidats aux concours donnent une bonne image des sujets d'intérêt du moment de la communauté scientifique que représente la section 05. Pour les CR, c'est environ 3/5 des dossiers qui portaient sur des thématiques de matière condensée, dont presque la moitié sur des sujets associés

à la physique des systèmes nanométriques ou confinés. La proportion complémentaire 2/5 correspondait à des dossiers de matière molle au sens large, dont environ une petite moitié portant sur des questions à l'interface entre physique et biologie. Pour le concours DR2, les proportions ressemblent davantage à celles de la répartition thématique de la section dans son ensemble, c'est-à-dire avec seulement un 1/3 de candidats aux profils de chercheurs en matière molle ou biophysique.

Un autre indicateur intéressant est le nombre de candidatures multi-sections. Sans entrer dans le détail, ces candidatures sont particulièrement nombreuses avec la section 11, sur des sujets de matière molle, ainsi qu'à l'interface entre physique et biologie, et, pour ces dernières, davantage que celles avec les CID 51 et 54. Elles se retrouvent également avec la section 03 (transport électronique et magnétisme), la 02 (physique théorique, notamment physique statistique hors équilibre), la 15 (synthèse et caractérisation des matériaux, hétérostructures), la 09 (mécanique du solide, ondes et bio-mécanique) et la 10 (fluides complexes, interaction fluide-structure). De telles candidatures soulignent à nouveau l'interdisciplinarité des profils et des approches des jeunes chercheurs, qui leur permet de proposer des sujets originaux. Elles ne sont cependant pas toujours faciles à évaluer et à comparer à celles thématiquement plus au centre de la section 05.

On constate ainsi une grande diversité des thématiques abordées en section 05 dont les chercheurs ont su, au cours des années, considérablement étendre l'assise initiale pour développer par exemple la physique d'objets biologiques ou de systèmes complexes, et pour faire évoluer la matière condensée vers la conquête de nouveaux matériaux. Ce foisonnement se reflète naturellement dans le grand nombre de candidats qui postulent au concours CR en 05. L'évolution, l'élargissement du champ d'action, et l'interdisciplinarité qui en résulte, sont assurément d'admirables signes d'une bonne santé scientifique. Mais il est important de souligner que celle-ci est demain mise en danger par une baisse du recrutement bien en-deçà du raisonnable,

baisse dont les conséquences probables sont le cloisonnement thématique, la hausse de l'âge d'embauche et la baisse de la proportion de candidatures féminines.

Conclusion

L'activité des chercheurs de la section 05 est remarquablement diverse et dynamique, associée à un grand spectre de thématiques abordées et une large gamme d'échelles spatio-temporelles explorées. Parmi les orientations actuelles, il faut noter une forte poussée des travaux sur les nano-matériaux et les nano-objets de toutes sortes, et une tendance très marquée à descendre dans les échelles en général. L'autre développement important est celui des recherches à l'interface entre physique et biologie, ce qui pose la question de l'opportunité de créer une section de biophysique à part entière – n'excluant pas un recouvrement non-nul avec les chercheurs s'intéressant à la physique des systèmes biologiques au sein de la 05 pour autant.

Si la section 05 se caractérise par son interdisciplinarité, avec de nombreuses interfaces internes entre ses sous-thématiques comme externes avec les autres sections, elle trouve son unité dans les méthodes et les approches employées. C'est en particulier la compréhension des liens entre les différentes échelles qui permet d'associer l'organisation et la structure des matériaux et systèmes à leur dynamique.

La diversité de talents et de points de vue des chercheurs de la 05 est une grande richesse de la section, qui seule peut permettre des percées conceptuelles et des innovations technologiques significatives. Celle-ci est aujourd'hui mise en danger par la baisse progressive et continue du recrutement depuis une dizaine d'années. Or le nombre de postes mis au concours ne doit pas se déduire d'une simple analyse quantitative des flux sortants, correspondants aux embauches d'il y a qua-

rante ans. Au contraire, les jeunes chercheurs d'aujourd'hui doivent répondre aux nombreux enjeux, questions, et difficultés actuels. L'effort

de recherche, celui du CNRS pour ce qui nous concerne, doit assurément être à la hauteur de ces enjeux.

ANNEXE 1

BCN : bore carbone azote

DFT : théorie de la fonctionnelle de la densité

DMFT : théorie dynamique du champ moyen

FIB : Focused Ion Beam

GdR : groupement de recherche

GIS : groupement d'intérêt scientifique

GPU : processeur graphique

GW : fonction de Green

hBN : nitrure de bore hexagonal

IRN : réseau de recherche international

MBPT : théorie de perturbation à N corps

MEMS : systèmes microélectromécaniques

MET : microscopie électronique à transmission

SAT : sonde atomique tomographique

STM : microscopie à effet tunnel

TDDFT : théorie de la fonctionnelle de la densité dépendante du temps

TGI : très grands instruments

XFEL : X-ray free-electron laser

SECTION 06

SCIENCES DE L'INFORMATION : FONDEMENTS DE L'INFORMATIQUE, CALCULS, ALGORITHMES, REPRÉSENTATIONS, EXPLOITATIONS

Composition de la section

Hubert COMON (président de section), Simon PERDRIX (secrétaire scientifique), Pierre ABOULKER (depuis septembre 2019), Pablo ARRIGHI (depuis septembre 2019), Sandrine BLAZY, Agnès BRAUD (jusque septembre 2018), Pierre CLAIRAMBAULT, Pascal DAYRE, Rémy DERNAT (depuis septembre 2019). Clarisse DHAENENS, Laurence DUCHIEN, Amélie GHEERBRANT (jusque septembre 2019), Nathalie GILLES, Jean-Marc LARRE (jusque janvier 2018), Dominique LAVENIER, Leo LIBERTI, Philippe OWEZARSKI, Celine SCORNAVACCA, Sylvain SENÉ (jusque septembre 2019), Pierre SENELLART, Pierre SENS, Gilles VILLARD, Igor WALUKIEWICZ, Laurent WEINHARD.

Introduction

Nous avons choisi dans ce rapport de faire porter l'essentiel de notre effort sur la collecte d'informations statistiques : effectifs, répartitions thématiques, genre, etc. Ces données ont été collectées par les membres de la section durant l'année 2018-2019. Nous proposons aussi des statistiques sur les concours de recrutement et les carrières des chercheurs de la

section, à partir des observations effectuées lors des 3 années de mandature écoulées. Cette collecte d'informations peut comporter des erreurs, que nous espérons marginales. Par exemple, les chiffres évoluent en permanence et certaines incohérences peuvent être dues à des dates de collecte d'informations légèrement différentes.

La part de l'interprétation et de la description des thèmes de recherche et de leurs évolutions est de ce fait plus réduite.

Dans la partie I, nous découpons en thèmes le périmètre couvert par la section 6. Nous comparons aussi les effectifs respectifs des chercheurs CNRS, des membres des UMR, des thèses soutenues, dans chacun des thèmes. Le tableau 1 résume ainsi l'un des principaux travaux effectués par la section pour ce rapport.

Dans la partie II, nous étudions la place des femmes dans la section (globalement faible) et la comparons à la place des femmes dans la discipline. Nous donnons aussi la répartition par genre dans les concours de recrutement (CR et DR). Les statistiques semblent indiquer que les femmes se censurent pour les candidatures CR, mais en revanche nous n'observons pas de «plafond de verre».

Dans la partie III, nous détaillons, de manière plus traditionnelle, l'évolution des thèmes de recherche de la section.

Enfin, dans la partie IV nous nous penchons sur les recrutements et les carrières des chercheurs en mettant à disposition toutes les statistiques que nous avons pu collecter. Un point saillant est l'importante mobilité sortante dans la section. Nous n'avons hélas pas pu la quantifier précisément car il faudrait des statistiques sur la durée, ce qui est difficile à obtenir à cause de la réorganisation en sections 6 et 7, relativement récente.

Dans tout le document, nous n'avons pas adopté l'écriture inclusive pour faciliter la lecture mais, bien entendu, quand nous parlons de «chercheurs», il faut comprendre «chercheuses ou chercheurs», par exemple.

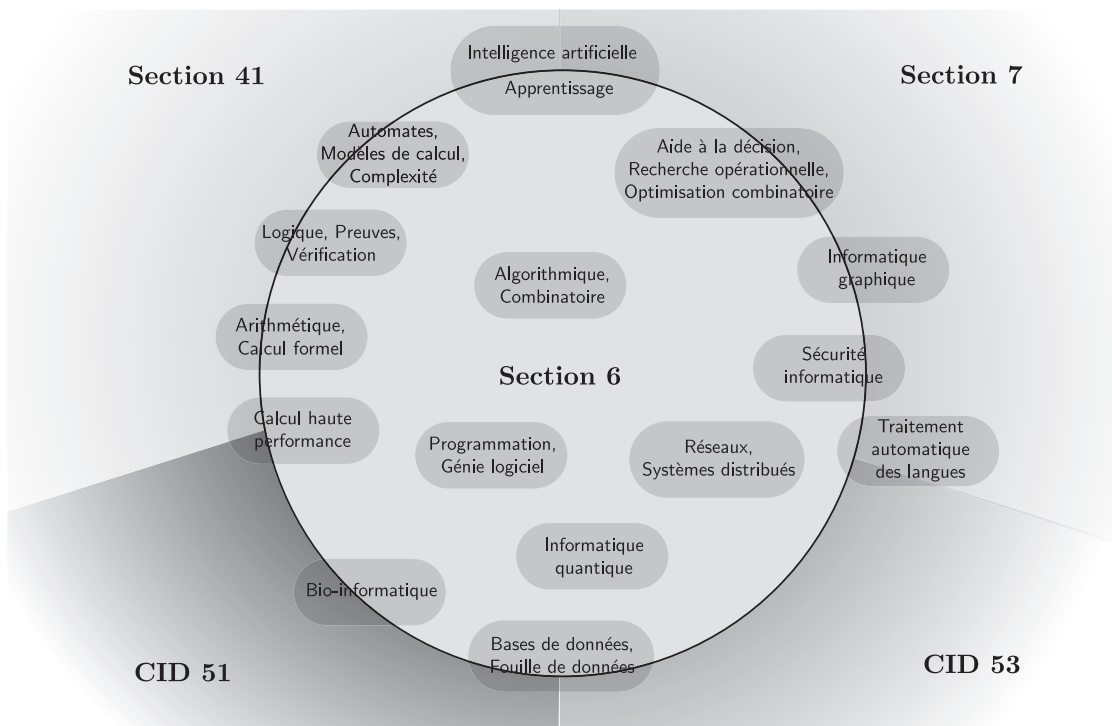


Figure 1 : Périmètre approximatif de la section.

I. Périmètre thématique et évolutions

Le périmètre thématique de la section et de ses voisines est grossièrement représenté dans la figure 1. Bien entendu, les thèmes de recherche ne sont pas étanches ; il s'agit d'une approximation. Les thèmes « apprentissage » et « intelligence artificielle », particulièrement en vogue, sont revendiqués par de nombreuses sections. Ils font partie des mots-clés de la section 6 depuis sa création, mais dépassent aujourd'hui largement le cadre de la section. Par exemple, le versant « statistique » peut relever de la section 41. L'apprentissage pour la classification d'images, ou le traitement automatique des langues, relèvera en revanche plutôt de la section 7, tandis que l'apprentissage statistique pour la mise au point de systèmes de recommandation relève de la section 6, etc.

Dans le tableau 1, nous reportons la répartition thématique des chercheurs, enseignants-chercheurs et thèses. Les chiffres donnés dans le tableau ont été obtenus de la manière suivante :

Chercheurs 6 : il s'agit de tous les chercheurs CNRS en activité (donc ne sont pas considérés ici les chercheurs émérites, les chercheurs en disponibilité ou en détachement...) dans la section 6 au 1^{er} janvier 2019. L'étiquetage thématique a été effectué manuellement par les membres de la section, à partir des rapports d'activité des chercheurs. Un chercheur peut émerger à 1, 2 ou 3 thèmes (nous nous sommes arbitrairement limités à 3). Dans les deux derniers cas il est compté respectivement $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{3}$ dans chacun des thèmes. Un chercheur de la section 6 peut aussi émerger à des thèmes hors section.

UMR-non-CNRS : il s'agit des chercheurs permanents, membres des UMR (ainsi que des UPR, UMI, ERL) dépendant de l'INS2I et associées à la section 6, et qui ne sont pas rémunérés par le CNRS. Pour notre discipline, il s'agit très majoritairement d'enseignants-chercheurs, mais aussi par exemple de chercheurs Inria. Les données ont été extraites de l'annuaire CNRS des UMR.

Comme l'effectif total à considérer est très important (3575 personnes), nous avons tiré uniformément un sous-ensemble de 25% des personnels, puis étiqueté thématiquement leur activité de recherche, en nous appuyant sur leurs publications et leur page personnelle décrivant leurs travaux.

Comme ci-dessus, chaque chercheur peut émerger à plusieurs thèmes et donc être compté pour une fraction dans plusieurs thèmes.

Thèses : les statistiques portent sur l'ensemble des thèses soutenues en 2017 en informatique. Nous avons utilisé l'API du site theses.fr pour récupérer l'ensemble des thèses soutenues en informatique et dans des disciplines voisines, et effectué une analyse manuelle des thèses soutenues durant cette année-là. 292 thèses étiquetées « informatique » (sur 874) ne relèvent pas de la section. Il y a bien sûr des thèses en traitement automatique des langues, en interaction homme machine... qui relèvent de la section 7. Mais, surtout, il y a beaucoup de ces thèses qui relèvent des mathématiques appliquées, voire d'autres disciplines très différentes (biologie, physique, sciences sociales...) pour lesquelles l'informatique n'est qu'un outil.

Dans tous les cas, les totaux peuvent différer légèrement de l'effectif total, à cause du cumul des erreurs d'arrondi. Soulignons aussi que l'étiquetage manuel requiert des interprétations qui peuvent parfois être contestables.

Tableau 1 : Répartition thématique des chercheurs de la section 6, des membres des UMR rattachées à la section et des thèses en informatique. Un échantillon d'un quart des personnels est considéré, comptage par fractions pour l'appartenance à plusieurs thèmes.

Thème	Chercheurs 6		UMR-non-CNRS	Thèses 2017	
	Nb	%	%	Nb	%
Algorithmique	31	10,2%	3,3%	18	3,1%
Combinatoire	37	12,2%	3,9%	24	4,1%
Arithmétique, calcul formel	11	3,6%	2,3%	5	0,9%
Calcul haute performance, calcul parallèle	9	3,0%	7,0%	32	5,5%
Automates, modèles de calcul, complexité	26	8,6%	2,6%	9	1,5%
Preuve, vérification, théorie de la programmation	46	15,6%	10,5%	31	5,3%
Sécurité informatique	16	5,3%	4,4%	47	8,1%
Génie de la programmation, génie logiciel	7	2,3%	10,0%	56	9,6%
Réseaux, systèmes distribués	15	5,0%	12,1%	90	15,5%
Données et connaissances	16	5,6%	16,8%	106	18,2%
Intelligence artificielle	28	8,9%	11,4%	77	13,3%
Recherche opérationnelle, aide à la décision	24	7,9%	10,2%	47	8,1%
Bio-informatique	27	8,9%	2,6%	21	3,6%
Informatique quantique	7	2,3%	0,7%	2	0,3%
Autres (section 6)	2	0,7%	2,3%	16	2,8%
Hors section 6	2			292	
Total	305			874	

A. Liens avec les autres disciplines

L'informatique est naturellement présente, sur le versant applicatif, dans de nombreux domaines frontières avec les autres disciplines.

L'informatique entretient aussi des liens forts avec les mathématiques : souvent des candidats sont admissibles à la fois en section 6 et en section 41, typiquement, en cryptographie, en calcul formel, logique informatique, combinatoire... Jusque récemment, le CNRS proposait des postes croisés.

CID 51 : Modélisation, et analyse des données et des systèmes biologiques : approches informatiques, mathématiques et physiques. Des chercheurs à l'interface entre informatique et biologie, et dont les thématiques de recherche relèvent explicitement de la section 6, sont régulièrement recrutés par la CID 51. La production massive de données biologiques dans les domaines de l'agronomie, de l'environnement ou de la santé, par exemple, devrait encore renforcer les liens avec la section sur des thématiques telles que la science des données, le calcul haute performance et la sécurité.

CID 53 : Méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques. Les liens entre l'informatique et les sciences humaines et sociales alimentent des problématiques de recherches traitées en CID 53, dont le comité comporte deux chercheurs de la section 6. Actuellement, 3 chercheurs (2 CR et 1 DR) sont rattachés à la fois à la section 6 et à la CID 53. Parmi les candidats à cette CID, des chercheurs abordent des problématiques en lien avec l'informatique comme éthique, droit et traitements de données individuelles (de santé, de réseaux sociaux) ; sciences cognitives et formalisation du raisonnement ou des comportements individuels et collectifs, humanités numériques (traitements massifs de données

de la recherche en SHS : textes, données, images...), étude des réseaux sociaux, philosophie des sciences, science et société, enjeux sociaux des nouveaux systèmes informatiques (objets connectés, robotique et assistants intelligents, exploitation de données et surveillance) ou encore analyse du langage naturel (en lien avec la section 7).

Informatique quantique. L'informatique quantique est un domaine dans lequel des compétences en physique et en informatique sont nécessaires. Chaque année, la section considère des candidatures de physiciens. L'un d'eux a été recruté en 2017.

II. La place des femmes

Le tableau 2 donne les effectifs par grade et genre des chercheurs en activité dans la section 6, au 1^{er} janvier 2019. On observe une très faible proportion de femmes. En revanche, il ne semble pas y avoir de phénomène de « plafond de verre » dans la section puisque la proportion de femmes DR est supérieure à la proportion de femmes CR.

Tableau 2 : Effectifs par genre en section 6.

Hommes	247				81,5%					
Femmes	56				18,5%					
	CR				DR					
Hommes	150		83,3%		97		78,9%			
Femmes	30		16,7%		26		21,1%			
	CRCN		CRHC		DR2		DR1		DRCE	
Hommes	146	83,9%	4	80%	63	80,8%	29	72,5%	5	100%
Femmes	29	16,1%	1	20%	15	19,2%	11	27,5%	0	0%

Cette analyse est confirmée par le tableau 3, qui montre la proportion de femmes recrutées sur les concours récents : le taux de femmes recrutées reste toujours supérieur au taux de femmes dans la section. Les deux tableaux pré-

cédents et le tableau 4 montrent ainsi que les carrières des femmes ont tendance à être légèrement plus rapides que celles des hommes en section 6.

Tableau 3 : Recrutements CR récents en section 6, par genre.

	Année de recrutement						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Femmes recrutées CR sec. 6 (nb)	3	2	2	3	3	2	3
Femmes recrutées CR sec. 6 (%)	25 %	20 %	25 %	27 %	21 %	20 %	30 %

Tableau 4 : Proportion de femmes au concours DR.

	2017	2018	2019
Candidates DR	9,5 %	13,6 %	10,8 %
Recrutées DR	16,7 %	28,6 %	25 %

Pour aider à analyser le faible nombre de femmes dans la section, le tableau 5 donne le ratio de femmes dans les UMR associées à la section (et dont les thèmes de recherche relèvent de la section 6), le ratio des thèses en

informatique soutenues par des femmes (en 2017, sur des thèmes relevant de la section) et la proportion de candidatures de femmes aux concours CR ces trois dernières années (à nouveau restreinte aux thèmes de la section).

Tableau 5 : Proportion de femmes au concours DR.

	Candidatures CR					
	Section 6	UMR-non-CNRS	Thèses (2017)	2017	2018	2019
Femmes	18,5 %	23,1 %	25,3 %	17,1 %	15,9 %	10,7 %

Nous observons donc d'une part que les femmes (en section 6) sont moins bien représentées au CNRS que dans l'enseignement supérieur. Nous observons aussi un net aggravement de la situation, puisque de moins en moins de femmes se portent candi-

dates. Soulignons en particulier que seulement 10,7 % des candidatures relevant de la section sont des candidatures de femmes en 2019, alors que 25,3 % des thèses relevant de la section en 2017 sont soutenues par des femmes.

III. Évolution thème par thème

A. Algorithmique

Les algorithmes sont parmi les objets centraux de l'informatique. S'attachant à leur conception, leur analyse et leur étude, l'algorithmique se retrouve donc dans tous les domaines couverts par la section 6. La conception et l'optimisation des ressources utilisées (temps, nombre de requêtes, encombrement, énergie, etc.) comportent un volet de mise en évidence de nouveaux paradigmes algorithmiques. Les interactions de la discipline avec les mathématiques sont fondamentales en particulier par le biais de la géométrie, de l'algèbre, de la logique et de la topologie (p. ex., l'étude des propriétés structurelles des algorithmes eux-mêmes). Les interactions avec la biologie sont également marquantes, par exemple en assemblage d'ADN et pour la modélisation du vivant.

L'étude des modèles non classiques (c'est-à-dire non discrets) ouvre actuellement un champ d'investigation important. L'algorithmique quantique devrait prendre plus d'ampleur. L'impact sur les autres sciences, la sécurité, la massification des données et les questions énergétiques donnent lieu à des enjeux formidables.

Au sein du GdR IM l'algorithmique est spécifiquement étudiée au sein du GT CoA dont la composition montre de vastes connexions avec d'autres domaines. On observe que la majorité de chercheurs répertoriés dans le thème (voir tableau 1) sont aussi associés à un autre thème et ne sont donc comptés que pour une fraction. Le nombre de chercheurs ayant une composante algorithmique dans leurs recherches est donc très supérieur à ce qui est indiqué dans le tableau 1.

B. Combinatoire

Ce thème couvre l'étude des familles d'objets discrets et se décline en combinatoire algébrique, combinatoire énumérative, combinatoire des mots, et théorie des graphes. Les problèmes rencontrés proviennent en grande partie de l'informatique : structures de données, calculabilité, complexité et analyse d'algorithmes. Les interactions sont très riches en bioinformatique, avec la physique et avec de nombreuses parties des mathématiques (géométrie, algèbre, théorie des nombres). La thématique se regroupe principalement au sein du GdR IM.

Les sujets d'actualité concernent la convergence d'objets aléatoires, ainsi que la combinatoire des cartes planaires plongées sur des surfaces de genre supérieur. La théorie structurale et algorithmique des graphes orientés doit se développer, les liens entre les méthodes paramétrées et les méthodes d'approximation représentent des enjeux importants. On peut penser que les outils d'aléa discret pourront à terme contribuer à diversifier les angles d'approches pour l'étude théorique des modèles de processus de renforcement ou d'apprentissage. Autour des systèmes dynamiques, des questions importantes émergent, concernant notamment la robustesse au bruit. En biologie systémique symbolique, la question qui va se poser dans les prochaines années est celle du changement d'échelle dans les approches de modélisation.

La combinatoire est un thème historique de l'informatique en France, avec une grande visibilité et reconnaissance internationale. Elle est bien représentée au CNRS et on constate l'excellent niveau des candidatures aux concours.

C. Arithmétique et calcul formel

Les recherches autour de la manipulation informatique des objets fondamentaux de l'arithmétique, de l'algèbre et de l'analyse ont fortement évolué avec des rôles clefs en mathé-

matiques expérimentales, cryptologie/codage et modélisation (systèmes dynamiques, géométrie & images, biologie...). Les percées théoriques et pratiques ont permis de renforcer les liens avec les autres disciplines. Une évolution récente est la réponse à des enjeux de garantie sur les calculs (codes critiques, sécurité, etc.) qui s'appuie sur des validations numériques ou formelles.

L'ancrage en informatique, au sein des GT Arithmétique et Calcul formel du GdR IM, permet de se confronter aux défis de : concevoir des solutions algorithmiques, logicielles et matérielles (vitesse, faible encombrement, basse consommation) de l'embarqué jusqu'aux supercalculateurs ; permettre l'amplification d'une vision hybride symbolique, certifiée et numérique du calcul scientifique, assurant robustesse des modèles et fiabilité des résultats ; tirer parti d'automatisations pour le développement et la preuve. Les liens sont nets avec le GdR Sécurité et en architecture avec le GdR SOC2. On s'attend à une accentuation des travaux en calcul haute performance et à une ouverture vers l'informatique quantique.

Au plan sociétal, en particulier avec les logiciels Maple ou SageMath, la discipline a un impact fort en formation scientifique. C'est sur l'équilibre entre l'informatique et les mathématiques dans l'enseignement, et sur les échanges entre ces deux domaines (des chercheurs sont membres d'UMR de mathématiques), que reposent la position internationale de tout premier plan de la communauté française et ses recrutements. Les chercheurs répertoriés en tableau 1 sont souvent associés à d'autres thèmes de la section et sont comptés pour fraction.

D. Calcul parallèle et distribué, calcul haute performance

Le calcul parallèle est un thème historique de l'informatique en France présent essentiellement dans les GdR Calcul, IM, RSD et GPL. Cette thématique recouvre un large spectre allant de l'exploitation efficace d'une machine

aux calculs sur des architectures massivement parallèles et hétérogènes, ainsi que distribuées telles que les clouds. On y retrouve des activités fortes autour du calcul numérique, des algorithmes parallèles, des modèles de programmation, et des supports d'exécution (OS et intergiciel).

La communauté a connu une forte évolution thématique liée aux architectures exascale, à la virtualisation avec les clouds, à la distribution avec le fog/edge computing, à la nécessité de tolérance aux fautes des grandes infrastructures, et à l'arrivée des grandes masses de données et de l'apprentissage automatique en tant que consommateur de ressources et fournisseur de nouvelles approches.

La question sociétale de l'efficacité énergétique fait l'objet d'une action spécifique du GdR RSD en lien avec le GDS Ecoinfo. La communauté porte aussi des plates-formes nationales telles que Grid'5000 et maintenant SILECS (en cours de construction) qui vise à resserrer et structurer les liens entre les chercheurs en systèmes, parallélisme et réseau. Depuis 2018, les Journées Calcul Données (JCAD) aident à créer des liens entre les différentes communautés liées au HPC (chercheurs, utilisateurs, et centres de calcul).

La politique de coloriage au concours a contribué à renforcer récemment ce thème qui reste encore peu représenté au CNRS.

E. Modèles de calcul et complexité

Les thématiques autour des modèles de calcul et complexité sont abordées par une large communauté de la section 6 et touchent à de nombreux autres domaines parmi lesquels l'algorithmique, la combinatoire, la logique ou encore l'informatique quantique. La discipline est transversale dans la section, en relation privilégiée avec les mathématiques au niveau des méthodes. On trouve des activités fortes sur les modèles de calcul centraux de l'école d'infor-

matique française (automates finis, machines de Turing) et également sur des modèles moins conventionnels (automates cellulaires, auto-assemblage, algorithmique distribuée...). Les développements sont toujours plus grands en direction de la modélisation et de la vérification des propriétés de systèmes de diverses natures. La thématique s'inscrit principalement au sein du GdR IM et partage des liens étroits avec les GdR IQFA et BIM.

Les défis sont nombreux ; sans vouloir être exhaustif, on peut citer :

- trouver des propriétés calculatoires des modèles et définir de nouveaux moyens d'appréhender la calculabilité adaptés aux modèles étudiés ;

- développer l'étude structurelle des classes de complexité en adoptant différents points de vue (algorithmique, algébrique, arithmétique) ;

- concevoir de nouveaux modèles de calcul tirant parti de la phénoménologie physique (calcul quantique) ou biologique (calcul moléculaire) et développer la connaissance de ceux existants.

Le domaine partage des liens privilégiés des disciplines telles que la physique et la biologie, à travers l'analyse des systèmes naturels complexes, et l'explication et la prédiction de certaines de leurs propriétés.

F. Preuve, vérification, et théorie de la programmation

La section 6 regroupe une large communauté autour de ces trois thématiques, qui entretiennent des liens forts. Les objectifs et méthodologies regroupent l'analyse et certification de systèmes et programmes (analyse statique, vérification de modèles...), la preuve formelle (théorie de la preuve, démonstration automatique, assistants de preuve...), et la théorie de la programmation (compilation, théorie des types, concurrence, sémantique...).

Les recherches sur ces thèmes s'inscrivent à titre principal dans le GdR IM. Elles ont de fortes interactions avec le GdR GPL (en particulier autour des langages de programmation, du typage, et de la preuve de programmes), et également avec le GdR Sécurité et son GT « Méthodes formelles pour la sécurité ». Certains sujets sont à la frontière de la section 41, comme la théorie de la preuve et de la programmation (via le GT LHC nouvellement créé avec le renouvellement du GdR IM) ou l'homotopie et les catégories, avec le GdR Top.

On a vu ces dernières années, quelques importantes évolutions thématiques. Les aspects probabilistes prennent une importance croissante dans l'analyse des systèmes et des programmes. L'analyse de modèles et systèmes concurrents voit une ouverture vers l'algorithmique distribuée. On observe une convergence entre la théorie de la programmation (avec ses outils catégoriques, algébriques, topologiques, etc.) et celles de la vérification, des automates et de la complexité. Un intérêt émerge autour du développement de méthodes formelles pour l'apprentissage et en particulier l'apprentissage statistique. Les liens avec l'IA se renforcent en particulier via les travaux en représentation de bases de connaissances. Les assistants de preuve formelle (Coq) et outils de démonstration automatique (SAT, SMT) ont un impact croissant dans de nombreux domaines en informatique et en dehors.

Ce thème de recherche dynamique est très bien représenté, aussi bien dans les UMR (10,5 % selon notre échantillonnage) que dans la section 6 (15,6%). Ce thème est un point fort, aussi bien historique qu'actuel, de la section. Le vivier de candidatures aux postes CNRS est grand, et les candidats sont d'excellent niveau.

G. Sécurité informatique

La principale évolution structurelle récente de la section concerne la création du GdR sécurité informatique dont le but est, entre autres,

de rassembler les chercheurs de ce domaine, auparavant éparpillés dans d'autres GdR : IM, GPL, SOC2, ISIS, RSD... Ce thème de recherche est globalement en expansion (plus de thèses soutenues en 2017 que de chercheurs + enseignants-chercheurs dans le tableau 1).⁽¹⁾ La section 6 du CNRS est surtout présente en cryptologie (9,8 chercheurs), peu dans les 5 autres groupes de travail du GdR (moins de 7 chercheurs dans l'ensemble des autres GT). Il faut noter cependant que certains groupes de travail relèvent aussi de la section 7 : sécurité des données multimedia, sécurité des systèmes matériels.

La sécurité informatique ne doit pas être vue comme du ressort exclusif des ingénieurs, même spécialisés. Ce serait une vision court terme dont les conséquences seraient néfastes.

Les recrutements récents (et la politique de coloriage au concours) tendent à renforcer la présence du CNRS en sécurité informatique. Elle reste cependant faible, notamment en sécurité système, domaine dans lequel il y a très peu (voire pas) de candidats.

H. Génie de la programmation et du logiciel

Le GdR Génie de la Programmation et du Logiciel (GPL) a été créé il y a maintenant 10 ans. Ce domaine de recherche permet de résoudre les problèmes posés par la complexité croissante des logiciels. Il rassemble les communautés qui travaillent sur la définition, la formalisation, l'évaluation des artefacts des langages de programmation, de la compilation, de la preuve, de la modélisation, du test, de la vérification et la validation, les approches empiriques et les outils associés pour la production logicielle actuelle et future. Quelques membres du GdR ont signé en juin 2019 un manifeste sur l'importance de la recherche dans le domaine pour la société.⁽²⁾

Ce domaine est actif de par sa représentation en termes d'enseignants-chercheurs et de

doctorants. Les enseignants-chercheurs sont très sollicités dans les départements d'enseignement des universités et des écoles d'ingénieurs pour former les futurs masters et ingénieurs en développement logiciel dont les entreprises ont tant besoin ; ceci explique le nombre d'enseignants-chercheurs recrutés sur les 20 dernières années. Par contre, le pourcentage de chercheurs dans la section est excessivement faible (2,3% – près de 5 fois moins que la proportion d'enseignants-chercheurs), malgré un coloriage Sciences du Logiciel proposé par l'INS2I depuis plusieurs années. Depuis 3 ans, 3 jeunes chargés de recherche ont été recrutés sur ce coloriage. De plus, l'année 2019 marque un tournant avec une augmentation significative du nombre de candidatures de qualité dans le domaine.

Il a fallu plusieurs années pour amorcer un vivier de candidatures excellentes ; ceci s'explique en partie par les nombreuses propositions de postes à haut potentiel faites aux jeunes docteurs du domaine par l'industrie en France ou par les universités à l'étranger, par une autocensure des candidats et des équipes, mais aussi par l'absence de recrutement au CNRS sur ce thème pendant de nombreuses années.

I. Réseaux et systèmes

Le GdR Réseaux et Systèmes Distribués (RSD) existe depuis plus de 25 ans, son intitulé, ses mots clés, son organisation thématique, etc., ayant été modifiés plusieurs fois avec l'évolution de ses champs de recherche. Le GdR RSD vise à contribuer à l'animation scientifique, à la structuration, à la dynamisation, à la promotion des savoirs et à la mise en synergie de ces deux pôles de recherche fondateurs des grandes avancées et innovations dans le domaine des STIC. Le GdR RSD couvre et intègre ainsi tout un continuum thématique constitutif des systèmes communicants à large échelle susceptibles de supporter des applications critiques.

La communauté RSD comporte majoritairement des enseignants-chercheurs, ces derniers étant largement présents dans les universités et écoles d'ingénieurs vu les besoins en formation de masters et ingénieurs dont l'industrie a besoin. Le flux de recrutements d'enseignants-chercheurs dans la thématique RSD dans les universités et écoles est donc soutenu pour répondre à ces besoins en formation. A contrario, le pourcentage de chercheurs de la thématique RSD dans la section fait partie des taux faibles, alors que dans l'enseignement supérieur cette discipline est la deuxième en nombre d'enseignants-chercheurs, et la seconde également en nombre de doctorants (5 % au CNRS, 12,5 % dans l'enseignement supérieur et 15,5 % des docteurs). Malgré un coloriage « Objets communicants, système, réseaux », proposé par l'institut INS2I depuis plusieurs années, seulement 2 jeunes chargés de recherche dans la thématique RSD ont été recrutés ces 3 dernières années (moins d'un par an). En effet, le nombre de candidatures de qualité dans ce domaine est toujours faible. Ceci s'explique en partie par la concurrence des entreprises en France ou à l'étranger pour les jeunes docteurs du domaine mais aussi par une autocensure des candidats et des équipes liée en partie au faible nombre de recrutements au CNRS pendant de nombreuses années sur ce domaine.

J. Données et connaissances

Ce thème recouvre l'acquisition, la gestion et l'exploitation de données et connaissances : les bases de données ; la fouille de données ; les systèmes de recommandation ; l'ingénierie des connaissances et le Web sémantique ; la recherche d'informations ; l'analyse du Web et des réseaux complexes. Une partie de ce thème est représenté dans le GdR MaDICS sur l'interaction avec les communautés scientifiques productrices et utilisatrices de données.

Ce thème est (voir tableau 1) celui du plus grand nombre d'enseignants-chercheurs dans les UMR (16,8%) et du plus grand nombre de

thèses soutenues (18,2% en 2017) parmi les thèmes de la section 6. Une partie importante de ces thèses (non précisément quantifiée) est réalisée en collaboration avec des entreprises (p. ex., thèses CIFRE) ou à l'interaction d'autres disciplines scientifiques. Ce thème est sous-représenté parmi les chercheurs CNRS de la section (5,6%) ; il est également sous-représenté parmi les candidats au concours, malgré l'affichage du thème « Science des données » au concours, en partie par manque d'attractivité des carrières de recherche au regard des conditions offertes par les industriels (en particulier les géants du Web), en partie par une autocensure vis-à-vis des concours CNRS.

La frontière de ce thème avec le thème « Intelligence artificielle » est parfois floue, par exemple entre fouille de données et apprentissage, ou entre Web sémantique et raisonnement sur les données. On note également des interactions avec certains thèmes de la section 7 : le traitement automatique de la langue, par exemple, relève de la section 7, tandis que la fouille de texte et la recherche d'information, qui utilisent des outils voisins, relèvent de la section 6.

K. Intelligence artificielle

L'IA fait traditionnellement partie des mots-clés de la section 6, mais ce thème est aujourd'hui partagé par plusieurs autres sections du CNRS (7, 41...). Les recherches en IA au sein de la section 6 concernent de manière historique des approches symboliques telles que la représentation des connaissances et la formalisation du raisonnement, entre autres par des modèles de graphes, la résolution de problèmes par satisfaction de contraintes, la planification et la recherche heuristique, la gestion de l'incertitude, les réseaux bayésiens, les systèmes multi-agents et la décision collective, ainsi que certains aspects de l'apprentissage automatique, en particulier l'apprentissage symbolique. Domaine particulièrement dynamique au regard du nombre de thèses soutenues, l'IA représente une part importante des chercheurs

de la section, avec des chercheurs très visibles et reconnus internationalement. Une majorité de ces chercheurs se concentrent sur les aspects logiques de l'IA (15 sur 28) alors que la répartition entre les différentes thématiques est plus équilibrée parmi les thèses soutenues.

Globalement, ces recherches sont impactées fortement par le succès de l'analyse de grandes masses de données à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique et particulièrement des réseaux de neurones artificiels. L'apprentissage a parfois supplanté des algorithmes exploitant des modèles logiques de connaissances, mais le défi actuel est d'utiliser au mieux leurs complémentarités, en particulier au service de l'explicabilité des systèmes et de leurs résultats. La maîtrise des analyses par apprentissage sur de grandes masses de données est un enjeu économique et stratégique de premier plan, que les États mettent en avant par des plans nationaux depuis 2017.⁽³⁾

Depuis 2016, la communauté est structurée grâce au GdR IA «Aspects formels et algorithmique de l'intelligence artificielle», lancé courant 2018 après avoir fonctionné comme pré-GdR durant 2 ans. Ce GdR a mis en place 6 groupes de travail propres dont trois s'intéressent justement au croisement entre apprentissage et raisonnement, apprentissage et résolution de contraintes et explicabilité. 4 autres groupes sont communs avec les GdR BIM (sur la Biologie Systémique Symbolique), IM (Informatique Mathématique), RO (Recherche Opérationnelle) et MaDICS (Masses de données).

L. Recherche opérationnelle et aide à la décision

La Recherche Opérationnelle (RO) et l'Aide à la Décision (AD) sont des disciplines hybrides, à la frontière entre mathématiques, informatique (algorithmique et intelligence artificielle), et certains secteurs du génie industriel et de Droit-Économie-Gestion (DEG), p. ex. l'économétrie. La RO/AD offre claire-

ment des points d'intersection avec les thématiques générales identifiées sous les étiquettes «MOA(Optimisation)/Jeux» de l'INSMI, «Aide à la Décision» de l'INSHS et, au sein de l'INS2I et avec la Section 7, autour des thématiques liées à la robotique et aux systèmes automatisés. Le caractère pluridisciplinaire et appliqué de la RO/AD pénalise parfois sa reconnaissance par des instances académiques. Néanmoins, le principal point fort de la RO/AD reste son ancrage au sein du monde socio-économique : discipline hybride, la RO/AD est naturellement proche du monde des entreprises.

L'émergence des nouvelles technologies autour de la mobilité, des systèmes de production, des communications induisent des prises de décision de plus en plus réactives, implémentées dans un contexte d'incertitude au travers d'architectures de communications complexes et de nature souvent collaborative. Elles tendent à poser des questions théoriques, algorithmiques et logicielles sensiblement nouvelles, souvent entre le niveau décisionnel système et le niveau embarqué, et à susciter de nouvelles déclinaisons de la notion d'approximation, mettant en jeu des systèmes à base de règles ou d'apprentissage supervisé.

Le tableau 1 montre que, pour la RO, la proportion des chercheurs CNRS / enseignants-chercheurs des UMR est en accord avec la proportion globale. L'historique des recrutements au CNRS montre un recrutement régulier au cours de ces dernières années.

M. Bio-informatique

La bioinformatique rassemble différents domaines scientifiques (bio, math, info) et cherche à améliorer la compréhension du vivant à partir des données morphologiques et moléculaires. Le GdR BIM structure cette communauté. La section 6 est bien représentée et participe activement avec 8,9% des chercheurs répartis dans 20 UMR affiliées principalement à l'INS2I.

L'évolution très rapide des technologies de séquençage et l'acquisition massive et automatisée de données, place les STIC au cœur de cette discipline. Ces données ont de fortes spécificités : elles sont massives, hétérogènes, multi-échelles et interdépendantes. Les domaines concernés par la section couvrent principalement l'algorithmique, la combinatoire, les bases de données, la théorie des systèmes dynamiques, la représentation des connaissances, l'apprentissage, les méthodes formelles et la modélisation de systèmes biologiques complexes.

Les principaux enjeux des années futures sont (1) la santé numérique ; (2) la génomique environnementale et la biodiversité ; (3) la gestion et l'intégration des données massives. Ils devraient renforcer des interactions avec nos thématiques comme, par exemple, la cryptographie homomorphe pour la gestion sûre des données patient, l'algorithmique parallèle pour traiter les grands projets métagénomiques, ou l'IA et l'apprentissage automatique pour identifier des signaux biologiques d'intérêt dans des données massives et bruitées.

N. Informatique quantique

La communauté de recherche autour de l'informatique quantique est structurée au niveau national par le Groupe de Travail Informatique Quantique du GdR IM (GT-IQ) et le GdR Ingénierie Quantique (IQFA), et en région parisienne par la fédération de recherche PCQC.

Le GT-IQ est à l'intersection de l'informatique quantique et des thématiques de la section 6, ce qui concerne les recherches en algorithmique, cryptographie et méthodes formelles afin de comprendre les capacités, les limites et l'utilisation de ce modèle de calcul émergent. Le CNRS a su être précurseur dans ce domaine avec une implication forte (cf. tableau 1), à noter cependant un seul recrutement de chercheur dans ce domaine dans la section depuis 2009.

Le GdR IQFA est plus large et regroupe physiciens et informaticiens du domaine des technologies quantiques, avec une large majorité de physiciens. L'informatique quantique est un domaine en plein développement avec notamment le *flagship* de l'UE sur les technologies quantiques et aussi l'implication d'acteurs industriels. L'arrivée des NISQ (*Noisy Intermediate Scale Quantum computers*) ouvre des perspectives immenses et aussi des problématiques nouvelles sur l'utilisation et la vérification de l'ordinateur quantique.

IV. Le recrutement et les carrières des chercheurs

A. Mobilité sortante

Nous n'avons pas de statistiques sur la durée pour la mobilité sortante, les détachements et disponibilités. Ceci est dû entre autres au fait que la section n'existe que depuis 8 ans. Néanmoins, nous constatons que, au 1^{er} janvier 2019, 41 chercheurs sont en détachement ou disponibilité. Ces 41 chercheurs n'ont pas été pris en compte dans les statistiques précédentes. Il s'agit d'une proportion importante de l'effectif : 12%. Nous donnons dans le tableau 6 une répartition de cet effectif par année de première demande de détachement ou disponibilité.

Par ailleurs, parmi les chercheurs examinés par la section durant son début de mandat (en principe, ceci concerne la totalité des chercheurs de la section puisqu'il y a une évaluation tous les 2,5 ans), nous avons observé très peu de cas de chercheurs revenus dans la section après un détachement ou disponibilité. On ne peut que conjecturer, au vu du tableau 6, qu'en moyenne 4 nouveaux détachements sont

demandés chaque année et donc qu'en moyenne au moins 4 chercheurs quittent la section chaque année, en plus des départs à

la retraite. Ceci doit être complété par les autres départs (définitifs), par exemple vers l'enseignement supérieur.

Tableau 6 : Année de première demande de détachement.

< 1999	1999-2002	2003-2006	2007-2010	2011-2014	2015-2018
1	2	3	4	17	14

B. Concours de recrutement CR

Le tableau 7 rapporte le nombre de chercheurs actuellement en activité dans la section 6, par année de recrutement. Bien que la

section, dans son périmètre actuel, n'existe que depuis moins de 10 ans, ce tableau donne les recrutements de chercheurs dont l'activité relève aujourd'hui de la section 6 et donne donc un panorama fidèle de l'évolution des recrutements dans la section.

Tableau 7 : Chercheurs en activité en section 6, par année de recrutement.

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
4	20	17	6	9	18	14	19	14	15
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
9	12	12	10	8	11	14	10	10	8

On observe une très nette diminution des recrutements durant la dernière décennie (environ moitié moins de recrutements). Ceci s'observe aussi sur la pyramide des âges

(tableau 8) : on observe un pic autour de 36-40 ans, alors que, comme nous le voyons dans le tableau 9, l'âge moyen de recrutement est inférieur à 31 ans.

Tableau 8 : Pyramide des âges en section 6.

	< 31	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	> 60
Total	14	39	67	60	47	35	28	13
CR	14	39	59	32	14	11	7	4
DR	0	0	8	28	33	24	21	9

Tableau 9 : Âge des chercheurs lors de leur recrutement comme CR en section 6.

Âge	< 28	28-31	32-35	> 35
Proportion (2012-2016)	9%	56%	26%	9%
Proportion (2017-2018)	10%	60%	30%	0%

Âge/Ancienneté des chercheurs recrutés en section 6. L'âge n'est cependant pas une donnée pertinente (et n'est pas pris en compte dans le recrutement). L'*ancienneté en recherche* est une mesure plus pertinente : elle est appréciée comme le nombre d'années consacrées à la recherche, thèse et éventuels stages pré-doctoraux compris.⁽⁴⁾ Avec cette mesure, le tableau 10 rapporte l'ancienneté,

évaluée au moment d'un recrutement éventuel, des candidats déclarés admissibles par le jury. Elle montre la volonté du jury de privilégier les recrutements de chercheurs dont l'ancienneté est inférieure à 7 ans. Le tableau montre aussi que la fusion des grades CR2 et CR1 a eu pour conséquence un abaissement de l'ancienneté moyenne en recherche des chercheurs recrutés.

Tableau 10 : Ancienneté en recherche des candidats admissibles aux concours CR, évaluée au moment de leur possible recrutement.

Ancienneté en recherche (thèse comprise)	4	5	6	7	8	9	10	> 10
2017	2	7	4	5	1	0	2	1
2018	2	7	3	6	2	1	1	0
2019	2	5	3	2	1	1	0	0
Total	6	16	11	13	4	2	3	1

Nombre de candidatures. Le tableau 11 rapporte le nombre de candidatures et le nombre de candidats ces 3 dernières années. Le nombre de candidatures totalise les candidatures CR1 et CR2 quand la distinction existait, mais n'inclut pas les concours spécifiques (car en général les candidats sur les concours spéci-

ifiques sont aussi candidats sur le concours général). Comme il peut y avoir des candidats à la fois sur un concours CR2 et un concours CR1, quand c'est possible, nous indiquons le nombre total de candidats (donc inférieur au nombre de candidatures). Le nombre de postes en revanche tient compte de tous les concours CR.

Tableau 11 : Nombres de candidats et candidatures aux concours CR en section 6.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Nombre de candidats					139	119	115
Nombre de candidatures	213	220	159	154	158	119	115
Retenus pour audition		90	63		40	37	32
Admissibles	21	20	21	17	22	22	16
Postes aux concours	7	8	8	9	8	11	8

Candidatures d'étrangers. Le tableau 12 rapporte les lieux de thèse des candidatures ces trois dernières années. Les thèses en cotutelle peuvent entraîner des nombres fractionnaires.⁽⁵⁾ Le tableau 13 donne les statistiques du concours pour les candidats ayant soutenu

une thèse hors de France. Ces tableaux indiquent une forte baisse du nombre de candidats étrangers. Ceux-ci réussissent en revanche plutôt bien le concours, mais le nombre de démissions est plus important.

Tableau 12 : Origine des thèses des candidats CR.

	2017	2018	2019	Total
Amérique du Nord	19	6	4	29
Amérique du Sud	3	5	4,5	12,5
Asie	0	4	4,5	8,5
Europe hors UE	11	3	2	16
Océanie	0	2	1	3
Union Européenne	39,5	32	15,5	87
Total hors France	72,5	52	31,5	156
France	126,5	80	82,5	289

Tableau 13 : Succès aux concours CR des candidats ayant soutenu une thèse à l'étranger.

	Candidatures	Auditionnés	Admissibles	Recrutés (en 06)
2017	36,4%	45,0%	45,4%	37,5%
2018	39,4%	29,7%	31,8%	18,0%
2019	27,6%	28,1%	18,8%	12,5%

Répartition thématique des candidats et politique d'affichage des thèmes prioritaires. L'institut a mené ces dernières années une politique volontariste d'affichage de

thèmes prioritaires pour le recrutement. Le tableau 14 indique la répartition des candidats par thème prioritaire (ou hors de thèmes prioritaires).

Tableau 14 : Candidats sur des thèmes prioritaires aux concours CR généralistes.

	2017	2018	2019
Réseaux et systèmes	9	12	8
Science des données	16	9	
Calcul parallèle et haute performance^a		6	5
Sciences du logiciel	7	8	7
Sécurité informatique^b	13	9	4
Intelligence artificielle^c			7
Tous les thèmes prioritaires	39	42	35
Hors thèmes prioritaires	81	77	80
Total candidats^d	120	119	115

^a Sauf 2017.^b Hors cryptologie pour 2019.^c Seulement 2019.^d Comme certains candidats émergent à plusieurs thèmes prioritaires, le total des candidats sur au moins un thème prioritaire est strictement inférieur à la somme des candidats sur chacun des thèmes prioritaires.

C. Promotions

Les tableaux 15 et 16 donnent respectivement les délais pour les passages aux grades

DR2 et DR1. Le délai 0 correspond à un recrutement directement dans le grade.

Tableau 15 : Ancienneté au CNRS lors du recrutement DR2.

Ancienneté (années)	0	1-5	6-8	9-11	12-14	15-17	18-20	> 20
Effectif	11	4	16	36	26	12	7	6

Tableau 16 : Ancienneté dans le grade DR2 lors d'une promotion DR1.

Ancienneté (années)	0	1-4	5-7	8-10	11-13	14-16	> 16
Effectif	2	0	13	13	5	5	1

D. Répartition géographique des chercheurs de la section

Le tableau 17 rapporte l'effectif des chercheurs rattachés à la section 6 dans les laboratoires ayant au moins 4 chercheurs de la section, avec la localisation géographique de

chaque unité (pour la région parisienne, nous distinguons Paris Centre, Paris Est, Paris Nord, Paris Sud).

Tableau 17 : Répartition des chercheurs de la section dans les unités ayant ≥ 4 chercheurs.

Unité	IRIF	LaBRI	LAAS	LIP	IRIT	LIP6	LIRMM	LIX
	Paris C	Bordeaux	Toulouse	Lyon	Toulouse	Paris C	Montpellier	Paris S
Effectif	24	23	17	17	16	16	16	16
Unité	LIG	IRISA	LORIA	LRI	G-SCOP	I3S	LIGM	LSV
	Grenoble	Rennes	Nancy	Paris S	Grenoble	Nice	Paris E	Paris S
Effectif	13	12	11	10	8	8	8	8
Unité	CRISAL	LAMSADE	LIPN	DI ENS	CRIL	LS2N	VERIMAG	
	Lille	Paris C	Paris N	Paris C	Lens	Nantes	Grenoble	
Effectif	7	7	7	6	4	4	4	

Conclusion

Les points saillants de ces statistiques sont d'une part la baisse alarmante des candidatures féminines et d'autre part le faible nombre de postes au concours : pour que la section 6 (informatique) conserve un effectif constant, il faudrait entre 11 et 14 recrutements par an, bien au delà des postes mis au concours.⁽⁶⁾

La discipline a beaucoup d'opportunités pluri-disciplinaires, qui doivent alimenter la

recherche cœur de métier. Parmi les thèmes émergents qui alimentent les recherches dans la discipline : exploitation de masses de données, respect de la vie privée, prise en compte de la consommation d'énergie, distribution massive de données et de programmes, explicabilité de l'IA, ordinateurs quantiques... L'évolution rapide des technologies présente de nouveaux défis à la discipline, qui alimentent les recherches du périmètre actuel de la section, qui n'a sans doute pas vocation à évoluer significativement.

Notes

(1) Voir https://www.allistene.fr/files/2018/03/VF_cartographie_2017-06-13.pdf dont les données sont collectées de manière très différente des nôtres.

(2) <https://gl.frama.io/manifeste/>

(3) <https://medium.com/politics-ai/an-overview-of-national-ai-strategies-2a70ec6edfd>

(4) Les maternités sont prises en compte pour ce calcul.

(5) Les candidatures multiples, soit sur plusieurs concours, soit plusieurs années consécutives sont comptées plusieurs fois. Par ailleurs les totaux peuvent être inférieurs au nombre de candidatures, à cause de certaines informations manquantes au moment de l'écriture de ce rapport.

(6) Cette estimation est obtenue en divisant le nombre de membres de la section par le temps moyen qu'un chercheur reste dans la section. Ce dernier chiffre ne peut pas être calculé de manière précise en l'absence de statistiques sur le long terme ; il est compris entre 23 ans et 28 ans.

SECTION 07

SCIENCES DE L'INFORMATION : SIGNAUX, IMAGES, LANGUES, AUTOMATIQUE, ROBOTIQUE, INTERACTIONS, SYSTÈMES INTÉGRÉS MATÉRIEL-LOGICIEL

Composition de la section

Pierre-Olivier AMBLARD (président de section), Lucie BAUDOIN (secrétaire scientifique), Patrice ABRY, Nicolas ANDREFF, Sébastien BRIOT, Marie CHABERT, Raphaëlle CHAINE, Laurent CONDAT, Christophe FONTE, Gersende FORT, Abdoulaye GAMATIÉ, Michel GAY, Nicolas HÉRAUD, Denis LESUEUR, Jean-Claude MARTIN, Gilles MILLÉRIOUX, Dimitri PEAUCELLE, Maxime PELCAT, Sophie ROSSET, François ROUSSEAU, Laure TOUGNE.

Résumé

La section 07 regroupe des thématiques de recherche dans les sciences de l'information, au cœur de l'intelligence artificielle moderne et de la société numérique. Les multiples disciplines de la section s'unissent pour relever des défis posés par les systèmes et les données en développant des méthodologies spécifiques. Parmi celles-ci, ce rapport donne des éléments

sur l'apprentissage, la gestion des grandes dimensions, l'optimisation et les interactions comme lignes de force traversant la section. Dans un deuxième temps, les apports des recherches en science de l'information à quelques grands enjeux sociétaux sont présentés. Enfin, des éléments sur la place de la recherche française et quelques réflexions sur la pratique de nos disciplines terminent le rapport.

Introduction

La section 07 (S07) développe des recherches au coeur des sciences de l'information. Ses principaux thèmes concernent l'automatique, la science des données (images, signaux, géométries), les interactions homme machine, le traitement automatique des langues et de la parole, la robotique, les systèmes intégrés sur puce, et enfin les applications de toutes ces disciplines dans les sciences naturelles (physique, biologie, chimie), humaines (économie, sociologie, psychologie) et en santé. Les sciences de l'information développées en S07 sont héritières de la cybernétique de Norbert Wiener. Pour le paraphraser, « *le but de la cybernétique est de développer un langage et des techniques qui permettent d'attaquer le problème du contrôle et de la communication en général, mais également de trouver un répertoire propre d'idées et de techniques pour classifier leurs manifestations particulières dans certains concepts* » (dans *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*, Houghton Mifflin, 1950).

Cette phrase sous-tend les fondements de la S07 : le développement de méthodologies pour traiter ou mettre en forme l'information portée par des systèmes ou des données à des fins d'actions, d'interaction ou d'extraction de connaissances.

Les recherches de la S07 sont au coeur de l'intelligence artificielle moderne, ancrée dans les données réelles, tant par les questions méthodologiques fondamentales que par les recherches applicatives. Ces recherches sont en lien fort avec les sciences naturelles et humaines, et à ce titre sont très interdisciplinaires. Elles exploitent des interactions entre mathématiques, physique et informatique, manipulent des données et des systèmes issus de la physique, de la biologie, de la linguistique, de la psychologie ou encore de l'économie. À l'interface de multiples disciplines, les chercheurs relevant de la S07 échangent avec des collègues spécialistes de ces domaines

variés pour développer de concert de nouvelles méthodologies dédiées.

La première partie de ce rapport décrit des défis méthodologiques actuels, de façon non exhaustive, qui définissent des lignes de force de la section. Quelques problèmes très actuels concernant les objets que manipulent les chercheurs relevant de la section, les systèmes, les données, leurs interactions, l'exploitation qui en est faite et pour quels types d'actions sont ensuite présentés.

La partie suivante illustre la place des recherches relevant de la S07 dans certains grands enjeux sociétaux. Le dernier paragraphe est dédié à la place de la recherche française dans le paysage mondial et précède quelques remarques sur la bonne pratique de nos disciplines.

I. Défis méthodologiques

Les chercheurs en sciences de l'information relevant de la S07 travaillent sur des objets complexes pour en extraire de l'information, les modéliser, les représenter, les observer, les contrôler ; ces objets présentent actuellement des défis importants, défis relevés à l'aide de méthodologies nouvelles développées en interaction avec les mathématiques, la physique, l'informatique et les disciplines dont ces défis sont issus.

A. Objets fondamentaux

1. Systèmes

De manière formelle, un système est un élément, ou un ensemble d'éléments qui interagissent et soumis à des lois de fonctionnement. Ces éléments peuvent être naturels issus des sciences du vivant ou de la terre (biologie, physique), artificiels (ordinateurs,

robots, parcs éoliens) ou immatériels (économie, langue, parole). Ainsi, de nombreux systèmes sont des équipements aux technologies variées, associant mécanique, électronique, chimie ou physique, conçus par l'humain ou par le biais d'assistance par ordinateur. Ils doivent remplir des tâches spécifiques répondant à des contraintes de fonctionnement. Le système est souvent soumis à des perturbations issues de l'environnement dans lequel il évolue et ses propriétés de résilience jouent alors un rôle important.

Les systèmes sont décrits par des modèles théoriques. Ces derniers sont nécessaires pour comprendre des phénomènes, analyser des comportements, détecter des événements, contrôler ou superviser un procédé. Leur formalisation constitue souvent un défi et les méthodes utilisées pour le relever sont variées. Les modèles peuvent être obtenus à partir des principes physiques ou construits par observation sur des données produites par le système. Les modèles prennent des formes multiples : équations mathématiques, graphes, algorithmes. Généralement, les modèles ne décrivent les systèmes que de manière approchée. L'approximation dépend des échelles de temps ou d'espace considérées, des dynamiques retenues ou négligées ou encore de l'exactitude des mesures.

2. Données

Les données sont les vecteurs de l'information. Elles peuvent être observées et obtenues par des spécialistes de domaines scientifiques divers (par ex. images satellitaires, traces sismiques, matrices de contacts génomiques) et parfois mises en forme par les chercheurs pour être exploitées (par ex. signaux pour les communications, lois de commande pour l'automatique, planification de trajectoires pour des robots, données textuelles ou de parole collectées et annotées).

Les données sont représentées mathématiquement par des variables dans des espaces discrets (données textuelles, données catégorielles, données quantifiées) ou continus

(mesures physiques), de dimension finie (signaux échantillonnés, images), voire infinie lorsque des représentations fonctionnelles sont appropriées (mouvements modélisés par des courbes, surfaces continues, phénomènes descriptibles par des équations aux dérivées partielles).

B. Défis actuels

1. Sur les systèmes

La nature des systèmes étudiés a connu un changement profond ces dernières années, principalement dû à l'avènement du numérique communément considéré comme la quatrième révolution industrielle. Durant de nombreuses années, les systèmes étudiés étaient principalement des équipements isolés, possiblement complexes. La révolution numérique induit un changement de paradigme avec l'avènement des « grands systèmes » ou « systèmes de systèmes » ou « systèmes interconnectés ». Il est alors nécessaire d'étendre les modèles à des entités qui communiquent à des échelles sans commune mesure avec celles des années passées. Les nouvelles technologies de communication, filaires, sans fil ou en réseau, ont permis d'interconnecter et donc de faire interagir des équipements distants géographiquement dans des proportions inédites. Le nombre d'entités interconnectées et leur forte hétérogénéité nécessitent de revisiter profondément les outils de conception, d'analyse, de surveillance et de pilotage de ces équipements. Les formalismes classiques ne s'appliquent plus nécessairement et doivent être adaptés. De plus, le mode de communication doit être intégré dans le modèle du système.

L'Internet des Objets (IoT), les systèmes cyber-physiques, les systèmes multi-agents (flottes de drones, de robots, de véhicules), les nouveaux modes de production et de gestion de l'énergie (Smart-grids) entrent dans cette catégorie de systèmes modernes. Induits par l'ubiquité du numérique, de nou-

veaux modes de production sont apparus. On leur associe le concept d'industrie 4.0 ou industrie du futur. La notion de systèmes et les modèles correspondants nécessitent d'appréhender de façon nouvelle des problématiques telles que la fiabilité ou la sûreté de fonctionnement.

À contre-courant du tout numérique, de nouvelles préoccupations sont apparues prenant en compte « l'humain ». La cobotique, (collaboration homme-robot), l'IHM (Interaction Homme-Machine) et les dynamiques d'opinion dans les réseaux sociaux intègrent par essence cette dimension humaine et font l'objet d'une attention toute particulière. Les systèmes intégrant l'humain sont par nature plus difficiles à modéliser. Proposer de nouveaux formalismes pour tenir compte de la variabilité des comportements, des incertitudes et des interactions, constitue des défis actuels.

Par ailleurs, toujours dans le contexte de l'ère du numérique, le déploiement massif d'unités de calcul embarquées dans des systèmes autonomes, improprement dits « intelligents », fait naître de nouvelles problématiques. Celles-ci doivent en effet réaliser de très nombreuses tâches au-delà de leur fonction principale, comme garantir la sûreté de fonctionnement, les communications avec les équipements extérieurs et la sécurité tout en consommant peu. Par ailleurs, la loi de Moore édictée depuis plusieurs décennies et stipulant que la puissance des calculateurs numériques doublait tous les deux ans a récemment été remise en question par des acteurs majeurs de l'industrie des semi-conducteurs. La conception même des systèmes doit intégrer ces nouvelles contraintes de limitation de la capacité de calcul et de ressources.

2. Sur les données

Le développement récent de ce que l'on appelle Intelligence Artificielle est dû à l'abondance des données de tous types d'une part, et à l'avènement d'architectures matérielles efficaces pour le calcul massivement parallèle (GPU) d'autre part.

Par exemple, les progrès considérables en traduction automatique utilisant de l'apprentissage profond viennent de l'analyse de grands corpus récemment disponibles. Il en est de même pour la reconnaissance de visages ou pour les premières versions de la machine à jouer au Go. Les chercheurs sont confrontés aujourd'hui aux données massives. Si cette abondance est bénéfique dans certains cas comme l'apprentissage supervisé, elle pose des difficultés quand il s'agit d'archivage, de transmission et de traitement. Par exemple l'IoT, qui repose sur la 5^e génération des communications numériques en cours de développement, nécessite des capacités de canaux grandissantes puisqu'il génère des masses de données gigantesques. Les ressources énergétiques étant limitées (en raison d'un enjeu sociétal majeur), des questions fondamentales de traitements de données massives avec des ressources limitées se posent.

Une des raisons de l'accroissement des données est également la multiplicité des modalités d'observation d'un même système ou d'un même phénomène. Par exemple, le cerveau humain peut aujourd'hui être observé à l'aide de multiples techniques d'imagerie (activité électrique et IRM, activité électrique interne et imagerie calcique...); les interfaces homme machine intègrent plusieurs sens (vision, ouïe et/ou toucher); les flottes mixtes de drones et de véhicules autonomes s'échangent des données partielles et multimodales issues d'une zone d'opération étendue. Ces multiples modalités offrent des perspectives nouvelles dans les traitements, comme par exemple l'accroissement de la résolution des images, ou dans les actions/interactions. Toutefois, l'exploitation conjointe de plusieurs modalités n'est pas toujours aisée et nécessite souvent la mise en oeuvre de techniques *ad-hoc*.

Par ailleurs, la nécessité d'obtenir des corpus annotés dans certaines disciplines à des fins d'apprentissage supervisé, comme en TAL ou en vision, ne peut se faire qu'au prix de coûts prohibitifs, et se doublant de questions éthiques importantes (violation d'intimité, esclavage numérique, biais de genre, impact

écologique, domination culturelle, fracture sociale). De nouvelles méthodologies dites semi-supervisées sont actuellement en plein essor (apprentissage par transfert, augmentation de données) et permettent de réduire les coûts.

Beaucoup de questions actuelles reposent sur des données qui peuvent exister dans des espaces de très grandes dimensions. Cette possibilité est ouverte par l'existence de systèmes de mesures permettant de sonder de nombreuses caractéristiques des phénomènes observés (comme l'imagerie hyperspectrale), ou simplement par l'existence de multiples capteurs délivrant chacun une information pertinente (réseaux de capteurs en surveillance sismique ou en génie civil). Il n'est pas rare aujourd'hui de traiter des données évoluant dans des milliers voire des millions de dimensions (par exemple en génomique), et les espaces de grandes dimensions posent des problèmes difficiles souvent dûs à des comportements contre-intuitifs des données (par ex. des points dans un espace de très grande dimension sont essentiellement équidistants les uns des autres).

La dimension de l'espace d'états peut devenir infinie, par exemple lorsque les données considérées sont des courbes (mouvement d'un membre), des surfaces, ou des fonctions d'une variable d'espace. Enfin, les données peuvent vivre dans des espaces ayant des structures très particulières (variétés différentielles, ensembles de graphes par exemple). La géométrie de l'espace peut alors être la source de l'information comme dans le traitement des mesures de nuages de points, ou demande à être élucidée pour traiter efficacement les données (réduction de dimension).

Les espaces géométriques de faible dimension nécessitent une attention particulière. C'est le cas en traitement de la géométrie lorsqu'on s'intéresse à la reconstruction de la topologie d'une surface à partir de données 3D échantillonnées sur un objet, lorsque l'on cherche à reconstituer ou classifier le mouvement d'un personnage, ou suivre une route avec un véhicule autonome. Un autre objectif de

l'analyse topologique de données est d'explorer, d'identifier et d'exploiter la structure sous-jacente d'un jeu de données. Les données se présentent dans ce cas sous forme de nuages de points équipés d'une métrique ou de mesures de dissimilarité, appartenant à des espaces de grandes dimensions mais concentrés autour de structures géométriques inconnues que l'on cherche à identifier.

La nature géométrique complexe de l'espace contenant les données peut ou doit également être prise en compte, comme en géométrie de l'information où les grandeurs vivent dans des espaces structurellement riemanniens (comme par exemple les matrices de rotation et/ou de déplacement en robotique ou les matrices définies positives en sciences des données).

C. Méthodologies

Un constat fort sur l'état actuel de la recherche en sciences de l'information S07 est l'omniprésence de l'apprentissage et de l'optimisation dans toutes les disciplines relevant de la S07. Par ailleurs, les problèmes liés à la gestion des grandes dimensions et des grandes masses de données sont également présents dans la plupart de nos disciplines. Enfin, les problèmes d'interaction sont très prégnants également. Ce paragraphe est consacré aux méthodologies dans ces domaines et développées par les acteurs des sciences de l'information S07.

1. Apprentissage

La théorie de l'apprentissage est au coeur de la S07. Si des recherches théoriques restent à mener, elle a atteint aujourd'hui une maturité technique telle que son utilisation conjuguée au flot de données devient ubiquitaire dans nos disciplines. L'outil incontournable à l'heure actuelle est l'apprentissage profond, qui est utilisé dans de multiples applications. Toutefois, un effort considérable reste à mener

pour le comprendre et le rendre utilisable avec des garanties de performance, dans des applications critiques (transports, santé, emploi, éducation...). Nous donnons dans la suite quelques éléments très actuels sur les recherches menées dans nos disciplines sur l'apprentissage en général, profond en particulier, et leurs applications.

Comprendre. Si la théorie de l'apprentissage statistique automatique a eu des avancées significatives dans les dernières décennies, les progrès récents de l'apprentissage profond et de certaines machines à noyaux résistent à l'analyse explicative. Le bon comportement en généralisation d'algorithmes appris sur peu de données est non intuitif. Des efforts dans diverses directions tentent actuellement de comprendre les mécanismes sous-tendant ces comportements. Par ailleurs, la théorie des grandes matrices aléatoires est un outil puissant avec lequel des progrès ont été réalisés, à la fois pour des explications du comportement de réseaux de neurones simples, mais également de machines à noyaux. D'autres approches fondées sur des transformées itérées (comme la transformée en scattering) qui ne sont pas apprises mais ont une structure proche des réseaux profonds (itérations de structures linéaire/non-linéaire) offrent des angles d'attaque intéressants pour comprendre le fonctionnement des réseaux profonds. Par ailleurs, des approches issues de la physique statistique sont de plus en plus utilisées dans la compréhension des algorithmes d'apprentissage, qu'ils soient profonds ou plus classiques, comme en clustering spectral.

Garantir. Les résultats spectaculaires dans de nombreux domaines d'application de l'apprentissage profond poussent leur utilisation pour des applications concrètes immédiates dans divers domaines. Si tel est déjà le cas par exemple pour des jeux ou de la traduction, ces applications sont loin d'être possibles dans des domaines où la conclusion prise par le réseau doit présenter des garanties (comme la santé, le transport autonome ou l'énergie). L'absence de compréhension du processus d'apprentissage automatique ne permet pas le développement actuel de garanties conduisant

à l'acceptabilité, ou expliquant avec certitude la décision prise par ces réseaux. Développer ces garanties avec un niveau de précision dépendant des applications est un chantier majeur autour de l'apprentissage profond. A cet égard, des développements récents dans les inégalités de concentrations, en optimisation stochastique ou en analyse fonctionnelle par exemple, sont des pistes pour l'obtention de ces garanties.

Apprendre. L'extraction d'information reste un objectif prépondérant de l'apprentissage statistique dans les travaux relevant de la S07. La résolution de problèmes inverses vus comme des problèmes statistiques est toujours d'actualité, ainsi que les techniques d'apprentissage par renforcement (étude des bandits stochastiques, prototypes d'études de prises de décisions séquentielles). Enfin, la maturité de certaines branches de l'apprentissage, par exemple les méthodes bayésiennes, autorise aujourd'hui les chercheurs à développer des méthodes de co-conception au plus près des applications, comme en imagerie biologique par exemple.

Agir. L'apprentissage concerne également la commande de robots, via le développement de méthodes de perception d'environnement complexes, de compréhension de scènes ou encore de développement de stratégies sensori-motrices pour des tâches complexes ou des structures difficiles à modéliser. La concrétisation physique inhérente à la robotique rend toutefois encore plus critiques les questions de garantie de résultat de ces algorithmes, de stabilité de la commande et de coût d'acquisition des données.

Maîtriser les ressources. Le contrôle et l'optimisation des ressources dans les systèmes intégrés sur puces repose en grande partie sur l'observation et l'analyse de divers événements. Ces derniers concernent les parties logicielles et matérielles d'un système. L'application des techniques d'apprentissage hors-ligne ou en-ligne aux échantillons de données collectées permet de prédire des métriques de performance (par exemple, le nombre d'instructions par cycle processeur, la fréquence d'accès à la mémoire), de consommation éner-

gétique, de température. Le résultat d'une telle prédiction sert ensuite dans la prise de décisions concernant l'allocation des ressources matérielles afin d'optimiser les comportements fonctionnels et non fonctionnels du système. Plus en amont, on peut souligner l'exploitation possible des techniques d'apprentissage en conception (choix de paramètres les mieux adaptés) ou en test (par ex. détection de configurations ou de comportements fautifs) de systèmes intégrés sur puce. L'augmentation du nombre de transistors par processeur (des dizaines de milliards aujourd'hui) provoque une forte inflation de l'espace de conception qui correspond à la quantité de degrés de liberté lors de la création et de la programmation d'un système. L'intelligence artificielle est donc maintenant utilisée également pour prendre les décisions complexes de cartographie et d'ordonnancement nécessaires au portage d'un système sur un substrat matériel.

Implanter efficacement. L'apprentissage est quasiment présent à toutes les échelles des systèmes, des gros serveurs centralisés jusqu'à des noeuds de calcul légers comme dans l'IoT. La réalisation efficace des algorithmes d'apprentissage prenant en compte à la fois la précision, la performance et la consommation énergétique pose un défi de conception conjointe logiciel/matériel. Si les performances des GPU ont grandement contribué à la réalisabilité d'algorithmes d'apprentissage profond complexes, l'efficacité énergétique reste une préoccupation d'actualité quant à l'implantation de ces algorithmes. Parmi les pistes pour y répondre, on peut mentionner les travaux sur les architectures *manycore*, les architectures neuromorphiques (spiking neural networks et technologies émergentes à base de memristors), les architectures sur puce basées sur le paradigme de calcul approximatif, les architectures basées sur le paradigme de calcul en mémoire, les architectures hétérogènes, etc. Cela couvre divers aspects liés à la conception, à la vérification et au test entre autres.

Éthique et biais. Les développements spectaculaires de l'apprentissage profond ont

mis en lumière des questions éthiques fondamentales que les chercheurs ne peuvent laisser de côté. Certaines causes, comme les bases d'apprentissage restreintes ou le besoin d'annotation de grandes masses de données, conduisent à des questions éthiques relevant non seulement de nos disciplines mais également de la sociologie, de la politique et de la philosophie.

2. Gestion des grandes dimensions

Les applications actuelles traitées en S07 concernent souvent des systèmes et des données vivant en grandes dimensions, voire en dimension infinie. Par ailleurs, la gestion et le traitement des données devraient représenter près du cinquième de la consommation électrique mondiale en 2025. Le traitement efficace de grandes masses de données est donc un enjeu majeur.

Compresser et calculer. Le développement des objets connectés a entraîné la génération de données massives (issues notamment de capteurs), accompagnées d'une quantité très importante de communications. L'impact sur les coûts en performance et en énergie des traitements et transmissions de données est fort. Pour y répondre, de nouveaux paradigmes voient le jour, à l'image de l'*edge computing*, ou il s'agit d'intégrer des infrastructures de calcul intermédiaires entre les supports périphériques tels que les capteurs et des unités de traitements centralisées (serveurs puissants) vers lesquels les données sont communiquées pour être traitées. Par exemple, en considérant une infrastructure formée par quelques machines légères proches des capteurs, des données collectées peuvent être pré-analysées au plus près des capteurs (sans solliciter les serveurs) pour éventuellement prendre des décisions (par exemple, actionnement ou contrôle). Les coûts de traitements et de transmission des données sont ainsi réduits. La conception de systèmes intégrés sur puce efficaces en performance et en énergie, adressant des paradigmes tels que le calcul à la périphérie représente ainsi un défi important pour

la gestion des données massives dans l'internet de ces objets connectés.

Dans ces approches décentralisées, pour des environnements contraints en énergie (où stockage et moyen de calculs sont limités), des stratégies de calculs efficaces nécessitent de ne conserver que les données pertinentes, ou des versions compressées des données. Les notions de core-sets développées initialement en traitement de la géométrie (sous-ensemble des données permettant des calculs à performances plus faibles mais garanties) ou de sketching permettent d'élaguer les données et de n'en conserver qu'un résumé très informatif. Ces techniques sont proches de la théorie de l'échantillonnage compressé. Une alternative à la conservation des données est le calcul en ligne qui permet d'extraire l'information sans conserver les données. Les algorithmes en ligne très en vogue dans la dernière décennie du xx^e siècle reviennent actuellement sur le devant de la scène comme moyen de calculs en ces situations contraintes.

Distribuer. Distribuer les calculs est inhérent à la gestion des données dans les réseaux de capteurs ou les flottes de robots. De nombreuses méthodologies (classification, commande, estimation, optimisation) ont des versions distribuées pour pouvoir être adaptées efficacement aux situations appelant la distribution.

Parcimonie. La grande dimensionnalité des données est souvent une difficulté mais parfois un leurre. Dans de nombreuses applications, la dimension effective de l'information est beaucoup plus petite que celle des données dans laquelle elle est cachée (par ex. variation d'une image sous l'effet du déplacement de la caméra, représentations éparses de signaux ou d'images dans des bases adéquates). Les techniques de réduction de dimension utilisent cet *a priori* et sont dessinées de façon *ad-hoc*.

Retour vers le continu. Le comble de la grande dimension est la dimension infinie qui appelle des approches particulières, relevant de l'analyse fonctionnelle. Par exemple, en automatique, de nombreux problèmes ne peuvent se modéliser qu'en envisageant des

systèmes de dimension infinie, comme le contrôle de phénomènes vibratoires ou flexibles, le contrôle aux frontières d'écoulements fluides, ou la prise en compte des retards dans les systèmes. Certaines applications en traitement du signal et des images nécessitent aussi des modélisations continues et de dimension infinie, comme en théorie du krigeage ou pour la modélisation de trajectoires complètes.

3. Optimisation

L'optimisation est mise en oeuvre pour l'estimation, la prise de décision et l'extraction d'informations des données. L'optimisation est une discipline qui va jusqu'aux mathématiques (analyse convexe, calcul des variations), et la recherche opérationnelle (planification industrielle, allocation de ressources) et qui imprègne aujourd'hui fortement les sciences de l'information S07.

Des méthodes modernes d'optimisation (éclatement proximal, activation aléatoire de variables et opérateurs) implémentées sur des architectures séquentielles, parallèles ou distribuées, sont développées par les chercheurs en sciences de l'information en lien avec les applications. L'exploitation par ces méthodes des propriétés de parcimonie (ou de rang faible) des solutions recherchées joue un rôle majeur dans leur efficacité. Les approches par factorisation sous contraintes de matrices ou tenseurs, ou encore par représentations parcimonieuses dans des dictionnaires, ont un vaste champ d'applications, de la génomique aux neurosciences, en passant par la géophysique, la finance, la télédétection ou l'étude du climat.

L'optimisation stochastique, résultant du couplage de procédures d'optimisation déterministes et de l'aléatoire, revient très fortement sur le devant de la scène de par ses applications en apprentissage et en intelligence artificielle, notamment pour l'entraînement des réseaux de neurones profonds ou comme modélisation de l'apprentissage séquentiel. L'aléa résulte souvent soit de la procédure d'acquisition des données ou observations

(dans le cas d'apprentissage séquentiel), soit de procédures d'échantillonnage Monte Carlo introduites comme outil numérique pour approcher des quantités incalculables (par exemple, dans la sélection d'un petit nombre d'échantillons dans une grande masse trop coûteuse à manier dans sa globalité). Il s'agit ainsi d'estimer des paramètres minimisant une certaine fonction de perte en moyenne ou au pire cas dans une classe d'intérêt, à partir de données où les incertitudes règnent.

Un terrain fertile pour l'optimisation, à la fois comme champ d'application et comme source de nouvelles approches, est la résolution de problèmes inverses régularisés de restauration et reconstruction d'images. Dans les problèmes de maximisation d'un critère d'attache aux données avec régularisation, les dernières avancées numériques mêlent des notions issues de l'optimisation à des concepts de simulation stochastique de type Monte-Carlo.

Par ailleurs, l'optimisation joue un rôle majeur dans le champ de l'automatique. Il est par exemple devenu standard de considérer une question comme résolue si elle se formule comme la solution d'un problème d'optimisation convexe, et presque résolue si elle est associée à des outils d'optimisation (éventuellement sur des fonctions non lisses, non convexes) efficaces en pratique. Cette évolution est marquée par une utilisation très importante en automatique de la programmation semi-définie (formulations par les inégalités matricielles linéaires) pour l'analyse des propriétés des systèmes dynamiques, et par le développement de logiciels pour la synthèse de correcteurs structurés.

À côté du progrès des algorithmes, sur le volet de la modélisation, le développement de relaxations convexes de problèmes non convexes de complexité combinatoire constitue un champ d'étude dynamique et les hiérarchies de Lasserre sont une avancée remarquable du domaine.

On observe aussi un regain d'intérêt pour l'application de méthodes de l'automatique à l'étude des algorithmes d'optimisation en

eux-même (par exemple obtention récente des vitesses de convergence des méthodes de gradient accéléré de Nesterov par les outils théoriques de la dissipativité). C'est un retournement étonnant que les inégalités matricielles linéaires prouvent les vitesses de convergence des algorithmes utilisés pour les résoudre ! Mieux, ces outils peuvent permettre la synthèse de nouveaux algorithmes d'optimisation aussi simplement que l'on fait la synthèse de lois de commande pour les systèmes dynamiques.

Enfin, le transport optimal connaît un intérêt croissant ces dernières années. Alors que les méthodes numériques disponibles ont longtemps cantonné cette théorie à la manipulation d'ensembles de milliers d'éléments au plus, des avancées majeures récentes, par exemple avec la régularisation entropique des problèmes, permet le passage à la grande échelle. Ainsi, il est maintenant possible d'appareiller rapidement deux nuages de millions de points, en minimisant le coût de transport de l'un à l'autre. Le transport optimal permet également de calculer des moyennes, d'interpoler, ou de classifier des formes géométriques, des visages dans des images, des textes avec des représentations en sacs de mots.

4. Interactions

Les interactions et leur étude ont une large place dans l'ensemble des disciplines de la S07, mais sont au coeur de quelques thématiques.

En IHM. L'Interaction Homme-Machine (IHM) est la discipline qui se consacre à la conception, l'évaluation et la mise en œuvre de systèmes informatiques interactifs pour l'usage humain ainsi qu'à l'étude des phénomènes majeurs qui les entourent.

Un des objectifs des recherches en IHM est donc de créer des systèmes interactifs adaptés aux capacités humaines. Les chercheurs étudient, développent et évaluent différentes formes de partenariats dynamiques humain-machine, et notamment de partenariats humain-IA, adaptées aux utilisateurs grâce à leur capacités de personnalisation, d'adapt-

tation dynamique et d'apprentissage. L'humain et la machine sont donc considérés ici comme un système complexe que l'on cherche à modéliser, à comprendre et pour lequel il est nécessaire de mener des recherches à de multiples niveaux : méthodes et cadres de conception, techniques d'interaction, protocoles d'évaluation. Ces recherches concernent aussi les données produites par ces interactions qu'il convient d'analyser et qui peuvent être complexes puisqu'elles concernent des contextes très variés : plusieurs humains interagissant avec plusieurs machines dans divers environnements et lors d'interactions répétées et continues au cours du temps (par exemple permettre à un utilisateur d'interagir avec ses données personnelles de santé issues de multiples objets connectés).

Parmi les thèmes de recherche actuels, on peut par exemple mentionner la conception de techniques d'interaction sans contact, l'intégration de multiples modalités de communication, la continuité tangible virtuel augmenté, les capacités d'interactions sociales et émotionnelles de la machine, les technologies motivationnelles, ou encore la visualisation et les interactions immersives grand écran.

En TALP. Le traitement automatique de la langue et de la parole occupe une place intéressante au sein des travaux en interaction humain-robot ou plus largement IHM. En effet, la parole et la langue sont des vecteurs de communication pour l'humain et les utiliser lors d'une interaction est naturel, rendant efficace la communication. Toutefois, les interactions en langue soulèvent des défis importants comme le traitement temps réel, l'adaptation à de multiples locuteurs ou utilisateurs, à la situation en cours, ainsi que la prise en compte dans l'analyse des énoncés des utilisateurs de l'ensemble de l'interaction (temporalité mais aussi modalité). De tels systèmes d'interaction vont mobiliser notamment des travaux sur les architectures hybrides permettant de tenir compte des différents niveaux de communication mis en jeu dans un modèle (alignement de modalité, modèle utilisateur et modèles statistiques). La multimodalité nécessaire à l'interaction humain-robot en

langue implique également des modèles de génération et des modèles de comportements qui ont un impact fort sur l'interaction elle-même. L'ensemble de ces modèles doit répondre à la contrainte forte du temps réel.

En robotique. On peut distinguer trois formes principales d'interaction concernant les systèmes que sont les robots. Leur interaction avec un environnement dynamique est un sujet historique (boucle perception-action) mais qui reste très actuel, que ce soit pour la préhension d'objets déformables, le positionnement précis d'instruments médicaux, le micro- assemblage 3D sur fibres optiques, la navigation de véhicules autonomes urbains ou de drones de maintenance. En particulier, l'interaction avec le vivant (santé, biologie, agriculture) pose le problème fondamental d'une variabilité (temporelle, spatiale, structurelle) difficilement modélisable. La deuxième forme est l'interaction humain-robot, déjà évoquée plus haut, dans lequel le partage du contrôle, les garanties de stabilité, le respect de l'intégrité et de l'éthique sont des problèmes ouverts. La troisième forme est l'interaction entre robots, qui mobilise communication et coopération. L'interaction multi-robots, par passage à l'échelle, implique de surcroît stratégie de coordination, multimodalité de perception, hétérogénéité des flottes, répartition et efficacité des calculs, modération énergétique, ou encore robustesse aux erreurs (capteurs, communication, calculs).

Ces interactions nécessitent l'utilisation ou le développement de capteurs et d'observateurs en lien étroit avec la conception mécanique, la commande, les communications et les architectures.

En informatique graphique et réalité virtuelle. L'activité de recherche autour du rendu d'une scène 3D peut être inscrite en amont de l'activité d'interaction, au sens où elle construit et donne à voir des contenus visuels à partir de modèles géométriques (maillages) en prenant en compte des modèles parfois complexes d'illumination. Ces algorithmes de rendu sont développés en s'appuyant sur les capacités des dernières générations de

cartes graphiques, en exploitant des stratégies d'échantillonnage des scènes ou de compression ad-hoc, ainsi qu'une modélisation de la lumière et de son interaction avec la matière. Pour permettre l'interaction d'un ou plusieurs utilisateurs avec de telles scènes virtuelles (ou augmentées), il est nécessaire de satisfaire des contraintes temps réel, associées ou non à des contraintes de photo-réalisme. Ces contraintes sont des plus ardues à satisfaire lorsque les scènes sont en mouvement. Une des grandes tendances de ce domaine, notamment dans l'industrie du jeu vidéo et de l'animation, concerne la génération procédurale de scènes complexes.

Par ailleurs, le domaine de la visualisation scientifique est en plein essor. L'idée est de coupler l'analyse de données pouvant appartenir à des espaces de grande dimension avec le développement de stratégies de génération d'images ou de projections, pour appréhender et gérer des masses de données, avec lesquelles le scientifique peut alors interagir.

II. Enjeux sociétaux

Les sciences de l'information développées en S07 sont au coeur de la société numérique. Elles contribuent intensément à de nombreux enjeux sociétaux. Cette section illustre des enjeux actuels pour lesquels les disciplines de la S07 apportent des avancées et des solutions.

A. Avancée des connaissances

Les succès récents et retentissants de l'astrophysique (imagerie du fond diffus cosmologique, mesure des ondes gravitationnelles, première image d'un trou noir) n'ont pu être obtenus sans des apports fondamentaux de traitement du signal et des images et l'utilisation de techniques d'apprentissage et d'opti-

misations puissantes et développées au plus près des expériences. La France est d'ailleurs partie prenante dans les deux premiers exemples avec des contributions majeures de membres de la S07. Par ailleurs, la théorie du contrôle a permis des exploits lors de la mission Rosetta, avec la première mise en orbite d'un satellite artificiel autour d'une comète. Le problème de la re-calibration rapide en vue de la synthèse efficace de contrôleur sur un modèle identifié au moment de l'approche du lander chargé d'expériences était un réel enjeu.

B. Société numérique

Près de la moitié des habitants de la planète possèdent aujourd'hui un smartphone et les réseaux sociaux comptent plus de trois milliards d'utilisateurs. En conséquence de l'évolution récente des technologies de l'information et de la communication, les frontières entre monde numérique et monde réel se font moins évidentes et plus complexes. Les aides à la mobilité changent notre rapport à l'espace urbain. Les réseaux sociaux influent sur nos relations inter-individus, les systèmes de notation changent nos habitudes d'achat, la compréhension du langage naturel par les machines rend la communication avec les systèmes plus aisée et plus efficace et les robots font de plus en plus partie de notre quotidien.

Ces nouveaux usages des technologies numériques ajoutent de nouveaux défis aux problèmes traditionnels liés au traitement de très larges masses de données :

- l'utilisation de la plupart des systèmes numériques nécessite aujourd'hui de transmettre ses données à un tiers et de lui faire confiance sur leur non-divulgaration, posant la question fondamentale de la sécurité informatique ;

- l'accès permanent au réseau et au monde numérique est considéré comme un acquis depuis le déploiement de la 4G en 2010. La 5G devrait pousser plus l'ubiquité du numérique, regroupant en un standard tous les

types d'interactions entre systèmes : à latence contrôlée, par exemple pour coordonner des véhicules, à faible débit et basse consommation pour interagir avec des objets connectés, et à haut débit pour échanger des données de grandes tailles telle la vidéo ;

– l'impact écologique croissant des systèmes se décline selon deux grandes modalités : l'énergie consommée par le calcul, le transport et le stockage des données (en embarqué ou dans le cloud) ; l'obsolescence rapide des systèmes associée au coût environnemental de leur recyclage ;

– l'accès aux données, briques nécessaires à l'apprentissage des modèles, soulève des questions d'éthiques, par exemple celle du respect de la vie privée ;

– l'interaction désormais physique avec l'humain amplifie les risques mais réveille aussi quelque peu les consciences quant à l'usage des technologies.

Les évolutions des systèmes annoncées pour les prochaines décennies incluent une multiplication des capteurs et actionneurs déployés dans l'IoT, une immersion possible dans un monde numérique ou de réalité augmentée, et une intelligence accrue des systèmes automatisés sous la forme d'une adaptation aux besoins des utilisateurs. Toutes ces évolutions renforcent les défis cités précédemment.

Les disciplines de la S07 sont au cœur de l'évolution de nos comportements vis à vis des technologies numériques. Le traitement en ligne de quantités de données, la compréhension et la traduction automatique des langues, les systèmes sur puce à basse consommation d'énergie, ainsi que les dispositifs d'interaction homme-machine participent à l'évolution des pratiques dans la vie privée et professionnelle, dans la pratique des sciences, des arts (l'art numérique est devenu un domaine à part entière), ou de l'enseignement.

Le développement extrêmement rapide et varié de l'apprentissage, déploiement dû à la conjonction de méthodes de calcul matériel-logiciel efficaces, d'exploitation de larges bases de données annotées, et du développement itératif

d'algorithmes neuro-inspirés, rend difficilement prévisibles les impacts sociétaux à court terme des sciences de l'information. Cependant, il est incontestable que ces impacts seront importants et que les problèmes posés nécessiteront une recherche agile, performante et réfléchie.

C. Santé

La santé est une application transverse pour tous les thèmes méthodologiques de la S07. Les travaux actuels répondent à des enjeux sociétaux importants comme la gestion du vieillissement de la population (par exemple, l'étude de la maladie d'Alzheimer, le développement de prothèses ou l'assistance domotique), les recherches sur le cancer, ou encore la gestion de données médicales, soulevant actuellement des questions d'éthique et de sécurité. Les méthodes développées au sein de la S07, notamment liées à l'intelligence artificielle, ouvrent de nombreuses perspectives pour l'amélioration de la qualité des soins, la réduction de leur coût à travers une prise en charge plus personnalisée et prédictive, mais également une meilleure traçabilité et une aide à la décision médicale améliorée. Dans ce contexte, le patient et son environnement (médecins, soignants, hôpital, famille) forment un écosystème complexe devenant le cadre de recherches en santé. On peut aussi souligner la variété des données à étudier : les données cliniques, le dossier patient, les données d'imagerie ou encore les données génomiques.

Un défi concerne l'analyse et la compréhension du vivant dans le but d'améliorer la prise en charge des patients. Il s'agit par exemple de tenter de modéliser un phénomène physiologique par un modèle numérique construit à partir de données *in-vivo* permettant d'effectuer des simulations par ordinateur afin de confirmer ou infirmer une hypothèse sur le fonctionnement du corps humain. Cela repose sur le développement de systèmes d'acquisition de données *in-vivo* rendu possible par un rapprochement entre des disciplines comme la physique et les sciences du numé-

rique. On assiste ainsi à l'amélioration de techniques comme l'imagerie par résonance magnétique, la tomodensitométrie spectrale ou la microscopie super-résolue et l'émergence de nouvelles approches comme l'imagerie ultrasonore ultrarapide ou à trois photons.

Les méthodes numériques développées permettent des avancées majeures dans l'aide au diagnostic et au geste thérapeutique (chirurgie et rééducation). Des outils d'aide au diagnostic performants sont développés grâce aux méthodes d'apprentissage statistique et la constitution de grandes bases de données, dans des domaines variées comme l'ophtalmologie, la dermatologie, la mammographie ou encore la cardiologie. Concernant le geste thérapeutique, dans le cas de la chirurgie, on parle alors de « cockpit chirurgical » où l'assistance peut intervenir en amont par un planning opératoire guidé par les données 3D du patient, et en per-opératoire par la chirurgie mini-invasive, la chirurgie robotique ou la réalité augmentée. En rééducation, de nouvelles approches se développent pour proposer une thérapie personnalisée au patient prenant en compte ses progrès fonctionnels grâce à un suivi contextualisé. La robotique a également des apports importants pour la rééducation fonctionnelle de certains patients paraplégiques.

Les avancées en TAL ou en IHM notamment ont permis le développement d'outils pour un meilleur suivi des patients par le biais d'agents conversationnels dotés de capacités langagières grandissantes. Enfin, la formation médicale est un point crucial et les méthodes de simulations et de développements de patients virtuels (permettant par exemple à l'étudiant en médecine d'acquérir les bonnes techniques d'anamnèse) ne cessent de progresser.

D. Climat/environnement

La robotique se met actuellement au service de l'environnement, de sa préservation et de sa gestion. L'impulsion lancée autour de la robo-

tique agricole au profit de l'environnement et de l'individu est notable pour :

- soulager l'agriculteur en créant des robots d'assistance logistique (cobots « mules » porteurs-suiveurs) ou de désherbage automatique afin d'éviter l'utilisation de produits néfastes à l'environnement.

- aider l'agriculteur à prendre des décisions en collectant des données (cartographie des cultures afin de définir le volume de végétation à traiter ou le type d'adventices avant pulvérisation afin de diminuer la quantité de pesticides/fongicides à utiliser ; mesurer la qualité et la quantité d'herbe dans les parcelles pour aider l'exploitant à ajuster et déplacer le bétail). Les outils de traitement d'images automatiques sont dans ce cadre de plus en plus utilisés avec des types d'imagerie variés allant de la « simple » photo RGB prise par smartphone aux images issues de caméras hyperspectrales embarquées sur le tracteur ou sur des drones.

La robotique au service de l'environnement ne se limite pas à l'agriculture. On retrouve des drones dans le cadre de la surveillance des incendies de forêt, afin de détecter au plus vite les départs de feu dans les régions à risque et aider les sapeurs-pompiers dans leur tâche. Les drones sont également utilisés pour effectuer la surveillance routière. Combinés à du traitement vidéo, ils permettent d'envisager une compréhension fine de la circulation pour éviter les congestions et par conséquent la pollution. Il est aussi envisagé d'utiliser des robots pour aider au nettoyage des environnements pollués par l'homme (collecte des déchets du continent de plastique dans le Pacifique par exemple). Enfin, des robots ont été récemment utilisés afin de protéger la grande barrière de corail : le sous-marin autonome LarvalBot a pour but de repeupler les récifs coralliens en larguant des larves de coraux.

E. Transports

L'utilisation du véhicule autonome, bardé de capteurs et capable de percevoir son envi-

ronnement, de l'interpréter et d'y évoluer, se développe. Si la plupart des véhicules pleinement autonomes évoluent actuellement à basse vitesse, les tests associés aux navettes autonomes pour les transport en commun se multiplient dans les grandes villes (Lyon, Paris, Nantes). À Paris, la navette circulant dans le quartier de la Défense a déjà déplacé près de 40000 usagers.

Si tous les grands constructeurs automobiles se sont emparé du sujet, il en reste néanmoins de nombreux enjeux en matière de recherche amont. Malgré des avancées spectaculaires, il y a encore de nombreux progrès à faire en matière de garanties de sécurité et les enjeux sont considérables au regard des contraintes de multimodalité et de quantité d'informations variées à traiter en temps réel. Il faut également noter que les véhicules autonomes ne seront pas utilisés que dans le contexte routier, mais également en contexte industriel, agricole ou militaire.

F. Énergie

La question énergétique occupe aujourd'hui une place primordiale pour les sociétés modernes aux besoins croissants. Au centre des préoccupations majeures, on retrouve la réduction de l'impact environnemental lié à la production de l'énergie (notamment l'émission de gaz à effets de serre), de sa distribution et de sa consommation sous diverses formes (électricité, gaz, essence). La transition énergétique vise à apporter une réponse en promouvant les énergies renouvelables à la place des énergies fossiles avec pour objectif une meilleure indépendance énergétique réduisant les coûts de consommation. Néanmoins, l'exploitation efficace sources variées d'énergies renouvelables est un réel défi qui nécessite des technologies dédiées au stockage optimal de l'énergie et à sa gestion intelligente, en tenant compte de la variété des modes de consommation. Au cœur des enjeux des villes intelligentes figure la maîtrise de la demande et de la planification énergétiques

des territoires (à travers les smart-grids notamment). Les technologies numériques jouent un rôle crucial dans ce contexte : avec d'une part l'intégration de systèmes embarqués mis en réseaux (IoT), permettant ainsi de collecter des données du terrain pour prendre des décisions, économiser de l'énergie ou réduire les émissions de gaz à effet de serre, et d'autre part l'enjeu complexe du contrôle de réseaux électriques très hétérogènes et dispersés avec la multiplication de sources d'énergie variées. Par ailleurs, il est important de garder à l'esprit l'impact délicat des technologies numériques au travers de la transition numérique. Un rapport⁽¹⁾ du groupe de travail « Lean ICT » dresse entre autres les constats suivants : la transition numérique augmente de 9 % par an l'empreinte énergétique directe du numérique (comprenant la fabrication et l'utilisation des équipements numériques) ; au niveau mondial, l'intensité énergétique de l'industrie du numérique augmente de 4 % par an alors que celle du PIB diminue de 1,8 % par an. Ce constat appelle à questionner d'une part les modes de fabrication des équipements numériques et d'autre part les usages au sein de nos sociétés.

G. Défense/Sécurité

La mise en place de traitements vidéos presque temps réel et avec des performances satisfaisantes permet désormais des applications en vidéosurveillance. Par exemple en surveillance de l'environnement pour la prévention des crues grâce au comptage des bois flottants sur les rivières ou le monitoring de la circulation grâce à la détection et au suivi des véhicules, la protection des personnes par le biais de leur détection et de leur suivi, éventuellement dans des foules, ou encore la gestion et l'estimation du temps d'attente dans des files dans des supermarchés ou des aéroports.

L'analyse faciale, qui joue un rôle important dans la communication humaine et qui est une des meilleures biométries pour l'identification, fait l'objet d'énormes efforts de

recherche. Plus récemment, les recherches dans ce domaine sont également axées sur l'analyse de gestes et de comportements avec des applications notamment dans le milieu médical, par exemple pour le maintien à domicile des personnes âgées ou pour le suivi de traitements en lien avec des maladies cognitives. L'avènement des méthodes d'apprentissage profond et des bases de données publiques de plus en plus nombreuses dans ces domaines permettent d'envisager que l'on pourra prochainement comprendre et prévoir le comportement d'une personne par analyse vidéo, levant à nouveau des questions éthiques importantes.

H. Industrie du Futur

Les robots sont utilisés de longue date dans l'industrie, mais sont généralement cantonnés à des zones spécifiques que les humains ne peuvent pas pénétrer. Une nouvelle génération de robots dits collaboratifs, ou cobots, intègre le monde industriel depuis le début des années 2010. Le chiffre d'affaire associé aux ventes de ces robots est estimé à 1,23 milliard de dollars pour 2025. Ces robots sont conçus pour être intrinsèquement sûrs pour les humains, afin de ne pas blesser un opérateur en cas de contact accidentel, et doivent donc être capables d'interagir et de collaborer avec eux en toute sécurité.

Les exosquelettes sont d'autres exemples de systèmes mécaniques automatisés que l'on rencontre de plus en plus en contexte industriel. Ces mécanismes se greffent sur certaines parties du corps de l'utilisateur afin de lui conférer une force accrue ou de lui permettre de supporter des charges trop lourdes pour lui, évitant ainsi l'apparition précoce de troubles musculo-squelettiques.

Le besoin industriel de reconfigurabilité des chaînes de production amène à l'utilisation de robots industriels montés sur bases mobiles ou sur rails, robots capables de changer rapidement de zones opérationnelles en fonction

des besoins. Un exemple marquant est le robot du projet Batiprint3D / Yhnova qui est capable d'imprimer des maisons en 3D, et a construit la première maison imprimée en 3D à Nantes en 2018 (95 m², 5 pièces).

Les interfaces homme-machine impactent aussi l'industrie actuelle. Elles permettent d'interagir avec les machines et d'optimiser des processus industriels complexes. Les chercheurs visent à concevoir des interactions avec des dispositifs industriels en prenant en compte l'humain, dans le but de surveiller les processus, diagnostiquer les problèmes, ou visualiser des données industrielles.

La réalité augmentée, les interactions tangibles et les robots sociaux se développent aussi dans des contextes industriels à des fins de contrôle qualité, d'apprentissage pour l'opérateur, de gains de productivité et de sécurité.

III. Place de la recherche française

La recherche française en sciences de l'information est située au meilleur niveau européen et international. En témoignent la participation dans toutes les disciplines de nombreux acteurs français aux activités de sociétés savantes prestigieuses (plusieurs chapitres des IEEE, IFAC, ISCA, ACML...) et de nombreuses reconnaissances de type *fellow*. Les acteurs français sont très actifs dans l'organisation, sans discontinuer et toutes disciplines confondues, d'évènements internationaux majeurs tels que DATE, INTERPEECH, ICML, IFAC World Congress 2017, ICRA 2020, RoboCup 2020, ou de *workshops/challenges* plus spécialisés. Enfin au niveau européen, l'obtention de nombreuses bourses ERC par des chercheurs du périmètre S07 atteste de la dynamique de notre recherche.

CONCLUSION

La visibilité et la proximité des disciplines couvertes par notre section scientifique avec les enjeux sociétaux modernes nous impose une réflexion forte sur les orientations et dérives possibles des applications de nos recherches. Cependant, une fois ce constat effectué, la question de la mise en pratique de cette réflexion, en particulier éthique, par les chercheurs eux-mêmes autant que par leurs institutions, reste une gageure. Nous n'allons pas ici lister les divers comités éthiques qui font un réel travail de dossier et de terrain, mais nous souhaitons évoquer la nécessité de l'ouverture de chacun à la réflexion transdisciplinaire (vers la philosophie, les sciences humaine, l'épistémologie...), socle d'une prise de recul responsable sur les avancées scientifiques qui émanent de nos disciplines.

Les sujets plus précis sur lesquels engager ce travail de réflexion sont nombreux. Plusieurs d'entre eux sont en particulier listés dans un document de synthèse produit par le Conseil Scientifique de l'INS2I en Septembre 2018 autour des algorithmes. Il est également important de soulever des questions légitimes sur les bonnes pratiques de recherche, la

reproductibilité des travaux et le partage des données, l'impact écologique de nos productions et des comportements sociaux (comme chercheur, comme utilisateur futur). Et par la suite, comment mettre en place des mécanismes pour réfléchir et gérer au mieux la boucle à évolution rapide liant science et société?

Ce sont ici simplement quelques éléments de réflexion éthique que le fonctionnement actuel de la recherche Française permet malheureusement assez peu. Il est ainsi souhaitable que les laboratoires de recherche, comme le CNRS, permettent et encouragent tout travail en ce sens.

Remerciements

Les membres de la section remercient chaleureusement les acteurs de la recherche française qui ont contribué à l'élaboration de ce rapport, en particulier les groupements de Recherche IGRV, IM, ISIS, MACS, MAGIS, MEGA, Robotique, Sécurité, SOC2, TAL, ainsi que l'AFIHM.

ANNEXE 1

IHM : Interfaces Homme-Machine

TALP : Traitement Automatique des Langues et de la Parole

SOC : Systèmes sur puce (Systems-on-chips)

IoT : Internet des Objets (Internet of Thing)

ANNEXE 2 : la Section 07 en chiffres

En septembre 2019, la section 07 compte 285 chercheurs actifs (60 femmes (F), 225 hommes (H)). Le corps des chargés de recherche compte 156 membres (37 F, 119 H), dont 10 Chargés de Recherche Hors-Classe. 71 personnes sont DR2 (13 F, 58 H), 46 sont DR1 (8 F, 38 H) et 12 sont DRCE (2F, 10 H). La proportion de femmes dans la section est de 21%. Un léger déséquilibre s'observe entre les CR (près de 24% de femmes) et les DR (19% de femmes) et la S07 est particulièrement attentive aux questions de genre dans l'ensemble des travaux qu'elle mène.

La grande majorité des chercheurs sont affectés dans des unités (principalement mixtes) de recherche de l'INS2I ou de l'INSIS. 26 sont affectés

à des laboratoires rattachés à d'autres instituts (INSMI, INSB, INSHS, INP, INEE). Thématiquement, 53 chercheurs travaillent sur l'Automatique, 43 en Traitement du Signal, 41 en Traitement des Images, 24 en Informatique Graphique/IHM/RV, 55 en Traitement de la Parole, des Langues, de l'Audio, 39 en Robotique, 18 en Architecture Matérielle et SOC, en enfin 23 en sciences de l'information pour les sciences du vivant.

Notons que les thématiques de la S07 couvrent des thématiques des sections 27 et 61 du CNU. Les UMR de l'INS2I relevant de la S07 sont ainsi essentiellement peuplées d'enseignants chercheurs de ces sections, et dont les travaux de recherches sont couverts par ce rapport.

Note

(1) «Pour une sobriété Numérique», <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-final-v8-WEB.pdf>.

SECTION 08

MICRO- ET NANOTECHNOLOGIES, MICRO- ET NANOSYSTÈMES, PHOTONIQUE, ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROMAGNÉTISME, ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Composition de la section

Claude AMRA (président de section), Philippe BENECH, Marie-Paule BESLAND, Catherine BRUCHEVALLIER, Béatrice DAGENS (membre du bureau), Frédéric DRUON, Mauro ETTORRE (membre du bureau, secrétaire scientifique), Eric LABOURÉ, Judikaël LE ROUZO (2016-2019), Bernard LEGRAND (membre du bureau), Aude LEREU, Christophe LETHIEN (2016-2019), Valérie MADRANGEAS, Nathalie MALBERT, Jean-Luc MONCEL, Marie-Cécile PERA (membre du bureau), Frédéric RICARDEAU (2016-2018), Isabelle ROCH, Nathalie ROLLAND-HAESE, Patrice SALZENSTEIN, Mathias VANWOLLEGHEM, Catherine VILLARD.

Résumé

La rédaction de ce rapport a bénéficié d'une aide appréciable des laboratoires adossés à la section 08, tous sollicités pour cet exercice récurrent ; on en trouvera ci-après une synthèse non-exhaustive déclinée sous forme de six thèmes : micro-nanosystèmes, énergie électrique, électromagnétisme et ondes, photonique, électronique, micro-nanotechnologies. Ces thèmes disciplinaires nourrissent spontanément une recherche pluridisciplinaire et satisfont à des exigences de savoir-faire inhérentes aux sciences de l'ingénierie.

Introduction

Les domaines scientifiques au coeur de la section 08 (photonique, électronique, électromagnétisme, énergie électrique, micro-nanosystèmes, micro-nanotechnologies) relèvent d'une recherche propre à leur périmètre disciplinaire et nourrissent parallèlement des activités pluridisciplinaires.

Les résultats de cette recherche favorisent la conception et la réalisation d'objets technolo-

giques complexes qui satisfont à des objectifs sociétaux (énergie, environnement, santé, communication, spatial, défense...) tout en resourçant les aspects disciplinaires. Les interfaces sont nombreuses avec les autres sections, dont en particulier les sections 09 et 10, les sections 06 et 07, les sections 03, 04 et 05, la section 28 et la CID 54.

De façon générale, la section 08, largement impliquée dans les domaines de l'énergie, du numérique et des procédés de fabrication, veut rappeler sa préoccupation face à la crise environnementale, incluant l'état des ressources fossiles et minières, les coûts énergétiques et écologiques de fabrication et de fonctionnement, le recyclage et la gestion des résidus. Ainsi, la dimension frugale des technologies constitue un axe à promouvoir. Elle trouve une déclinaison dans l'ingénierie verte dont les procédés sont développés dans le souci du respect de l'environnement, limitant la pollution générée et favorisant l'usage des matières premières naturelles et bio-sourcées pour la production des substrats et des substances intervenant dans la fabrication des dispositifs. L'effort dans ce domaine est essentiel compte-tenu des enjeux sociétaux globaux, et il convient de le soutenir et de l'amplifier.

I. Micro-nanosystèmes

A. Matériaux et technologies de fabrication

La réalisation des dispositifs micro-nano-systèmes exploite une grande variété de matériaux et de technologies de fabrication qui ont rapidement enrichi l'utilisation historique du silicium et de ses dérivés, micro-usinés voire nanostructurés par des techniques sacrificielles. Ainsi les matériaux actifs, fonctionnels, souples ou étirables font l'objet d'attentions toujours plus soutenues, en particulier lorsqu'ils peuvent être intégrés et structurés à

large échelle par des méthodes descendantes ou ascendantes. Les propriétés physico-chimiques de volume, de surface et d'interface sont primordiales et requièrent une complémentarité disciplinaire avec la mécanique, la chimie – incluant nano-objets et nano-matériaux – et la biologie, prenant également en compte les problématiques de fonctionnalisation de surface. En particulier, les matériaux polymères et les gels confirment leurs intérêts et avantages pour des applications dans les domaines de la microfluidique, des laboratoires sur puce, des systèmes implantables mais également pour la robotique souple, le textile intelligent et le *wearable* (technologies portables). Parallèlement, les technologies additives de fabrication et d'impression 2D et 3D prennent une place grandissante pour la réalisation des dispositifs avec la mise en place de plateformes dédiées dans les laboratoires, offrant des possibilités nouvelles d'élaboration de structures multi-échelles complexes, d'intégration hétérogène organique / inorganique, et de bio-impression. Elles concourent aux approches éco-responsables de la fabrication en limitant les quantités de matière nécessaires, les résidus de fabrication et la dépense énergétique tout en réduisant aussi le coût global.

B. Systèmes autonomes en énergie et communicants

Les systèmes autonomes en énergie et communicants, distribués dans l'environnement, intégrés dans des biens, portés par des individus ou implantés dans des organismes, poursuivent un développement rapide dans la mouvance de l'essor des dispositifs nomades et de l'internet des objets. Ils sont portés par la convergence :

– des besoins socio-économiques : surveillance répartie de la qualité de l'environnement de la ville et des bâtiments, détection précoce des défaillances, santé et sécurité des biens et des personnes, applications médicales,

– des capacités offertes par les technologies de l'information, comme l'interopérabilité et l'intégration des communications dans le cadre des réseaux de 5^e génération, la gestion et l'exploitation des grandes masses de données, l'intelligence artificielle.

Au niveau des dispositifs micro-nanosystèmes, les développements concernent la poursuite de la miniaturisation et de l'augmentation des performances des capteurs, actionneurs et circuits électroniques, l'intégration hétérogène et le développement des matériaux souples, biocompatibles et/ou biodégradables, l'encapsulation des systèmes, et la réduction des consommations. La gestion de l'énergie est cruciale pour une majorité de systèmes abandonnés dans le milieu environnant ou implantés dans un organisme. Ainsi, le grappillage énergétique et la télé-alimentation continuent à faire l'objet de recherches soutenues et d'innovations, comme par exemple le développement de matériaux et d'architectures nouvelles pour la conversion photovoltaïque et thermoélectrique, la production d'hydrogène par photo-catalyse à la micro-échelle pour une production différée d'énergie électrique, ou la transmission ultrasonore de l'énergie et de l'information à l'intérieur d'un organisme. Le stockage de l'énergie dans des dispositifs miniaturisés est par ailleurs incontournable pour pallier l'intermittence de la production, de la récupération et de la conversion de l'énergie, ainsi que pour répondre au profil de la consommation du système communicant notamment pour des applications dans le domaine de l'internet des objets (IoT). Il faut en effet disposer de la capacité énergétique suffisante pour assurer l'alimentation permanente du système mais également pour répondre aux appels de courant instantané lors des phases très énergivores de transmission de données sans fil sur l'interface radiofréquence. Une micro-batterie de type lithium-ion couplée à un micro-supercondensateur fabriqué sur substrat par les techniques collectives de microfabrication apparaît comme une combinaison idéale pour répondre à ce besoin. Cette thématique centrée sur la fabrication de micro-dispositifs de stockage électrochimique de l'énergie fait l'objet d'une activité intense,

pluridisciplinaire. Elle est organisée autour du réseau RS2E au niveau national et elle se structure à l'échelle européenne dans le cadre de l'initiative de recherche BATTERY2030+.

C. Capteurs physiques

Les capteurs de grandeurs physiques constituent une part importante des applications des micro-nanosystèmes et nombre d'entre eux ont été adoptés par l'industrie depuis des décennies, équipant de multiples produits grand public et de large diffusion. Les enjeux résident dans l'amélioration des performances métrologiques, à la fois au bénéfice du service rendu par les applications, mais également pour répondre à des besoins de niche, de volumes moindres, dans les domaines militaire et spatial ou pour des applications exigeantes à haute valeur ajoutée par exemple. Les efforts se portent sur le développement de dispositifs capables d'opérer en environnements sévères, températures et pressions élevées, vibrations, rayonnements, agressions chimiques..., ce qui amène à l'utilisation de matériaux tels le nitrure de gallium, le carbure de silicium ou le diamant pour la réalisation des structures sensibles assurant la transduction du mesurande en un signal électrique exploitable.

Les aspects de conception fiable, résiliente et résistante aux défauts, associés au développement d'algorithmes de traitement des données, contribuent également et largement aux progrès dans le domaine. Il est important de noter que les performances ne bénéficient pas nécessairement de la miniaturisation ultime des structures sensibles. Elle peut même être contre-productive du fait des lois d'échelle des principes physiques exploités, par exemple pour les effets inertiels ou lorsque des phénomènes diffusifs vis-à-vis de surfaces de capture sont en jeu. Toutefois, l'exploitation de réseaux denses de nano-capteurs associés à un traitement corrélé des données est une approche avantageuse qui, à même surface de capteur, permet de concilier haute performance et fiabilité par redondance.

En termes de principe de transduction, l'optomécanique confirme son entrée remarquée dans les sciences de l'ingénierie. La thématique bénéficie de la convergence des travaux de la physique fondamentale des quinze dernières années et de la maturité de niveau industriel atteinte aujourd'hui par les plateformes de fabrication de la photonique sur silicium pour la réalisation de composants. Elle ouvre des fenêtres d'application inédites pour les micro-nano-capteurs vibrants en apportant une résolution et une sensibilité de mesure supérieures de plusieurs décades à celles des transductions électromécaniques usuellement employées pour ces capteurs MEMS et NEMS. Par ailleurs, des études font montre d'un intérêt grandissant pour l'exploitation des capteurs et des dispositifs dans des régimes qui auraient été auparavant évités dans les applications. Par exemple, le fonctionnement fortement non-linéaire des micro- et nano-dispositifs vibrants a dépassé le cadre de l'intérêt fondamental pour ouvrir des perspectives concernant la génération de nombres aléatoires et la cryptographie chaotique dont le micro-système électromécanique constituerait la clef physique.

D. Capteurs et dispositifs d'analyse pour l'environnement

La pression anthropique croissante sur l'environnement a un impact direct sur la biodiversité, la qualité des ressources et *in fine* la santé des populations humaines. La mise en place d'une surveillance des écosystèmes, de l'air et de l'eau, *in situ* ou *in vitro*, est un point essentiel pour la compréhension, l'analyse, l'anticipation et la prise de décision. Par exemple, la proposition d'outils de surveillance de l'air et de l'eau potable, utilisables sur le terrain sans nécessité d'infrastructure ni de savoir-faire particulier, permet de répondre à la stratégie des programmes mis en œuvre pour le respect des méthodes, protocoles et des normes nationales et internationales. La poursuite du développement des laboratoires sur puce constitue une clef pour répondre à

ces besoins d'analyse des fluides. Qu'il s'agisse de la détection de molécules chimiques ou biologiques, ces plateformes basées sur la microfluidique visent à manipuler des volumes très réduits d'échantillons et de réactifs. Elles font appel à des transductions variées, fondées par exemple sur des principes électriques, électrochimiques, électromagnétiques, optiques ou mécaniques qui peuvent être combinés entre eux. Leurs performances sont essentielles et les efforts se concentrent sur l'amélioration de la limite de détection, de la résolution et de la rapidité de mesure. La fabrication de ces plateformes d'analyse tire avantageusement parti des technologies additives et des développements menés pour l'intégration hétérogène de matériaux fonctionnels ou nano-structurés, en particulier pour ceux formant les couches sensibles de détection dont la sélectivité demeure un enjeu majeur, notamment dans le domaine de l'analyse des mélanges gazeux complexes.

E. Systèmes et dispositifs en interface avec le vivant pour le médical et la santé

Les programmes liés aux grands enjeux sociétaux promeuvent de manière importante le développement des technologies et des dispositifs pour le vivant et la santé dans le cadre du diagnostic précoce, du suivi des maladies chroniques et dégénératives, du vieillissement de la population et de la médecine personnalisée. Ainsi, les activités et les forces mobilisées sur ces thématiques sont en constante croissance dans les laboratoires relevant de l'INSIS. Elles s'accompagnent de collaborations nombreuses et vertueuses avec des laboratoires de biologie et des sites médico-hospitaliers, permettant d'accroître la pertinence et la portée des expériences menées *in vitro* et *in vivo*, le développement de la médecine translationnelle voire la création de structures mixtes accueillant des personnels des mondes des sciences de l'ingénierie, hospitalier et médical.

Les applications concernent par exemple l'analyse non-invasive ou mini-invasive de marqueurs biologiques, le suivi continu de l'état de santé du patient à domicile, les dispositifs médicaux de délivrance ciblée de molécules thérapeutiques ou de stimulations nerveuses, ou les implants prothétiques atraumatiques réalisés spécifiquement pour la morphologie d'un patient. Ainsi, les enjeux de la biopsie liquide, technique non-invasive, concernent la capacité à isoler et à analyser des bio-marqueurs présents dans un échantillon de liquide physiologique pour le diagnostic précoce et le suivi thérapeutique de maladies telles les cancers. Ces bio-marqueurs peuvent être des molécules, des fragments d'ADN, des exosomes ou des cellules tumorales circulantes. Par ailleurs, les interfaces bioélectroniques permettent par exemple d'étudier et de stimuler l'activité neuronale à des fins de connaissance fondamentale et d'applications thérapeutiques. Un axe de recherche consiste à augmenter la densité des électrodes des micro-nano-dispositifs et la qualité des contacts électriques au bénéfice de la résolution de mesure des systèmes, qu'il s'agisse de plateformes électro-physiologiques *in vitro* ou d'implants *in vivo*. Ces derniers sont aussi confrontés aux problématiques de l'insertion dans le tissu vivant, ce qui nécessite de développer des matériaux fonctionnalisés qui soient biocompatibles voire bio-résorbables, qui réduisent la réponse inflammatoire tout en ayant des caractéristiques de rigidité mécanique comparables à celles du tissu.

Finalement, en liaison avec les systèmes autonomes et communicants, nombre de dispositifs destinés aux applications médicales et à la santé mettent en œuvre des communications par ondes électromagnétiques à proximité de, voire dans l'organisme vivant, pour lesquelles les antennes constituent un élément essentiel. Leur conception et leur rayonnement doivent non seulement prendre en compte la proximité du milieu biologique hétérogène et complexe mais également les effets des ondes sur les cellules biologiques et les tissus vivants, ce qui contribue à la thématique de recherche concernant le bio-électromagnétisme.

F. Systèmes micro-physiologiques micro-fluidiques

Les systèmes microphysiologiques sont des systèmes modèles qui permettent l'étude de phénomènes complexes, en particulier biologiques, dans des systèmes maîtrisés, simplifiés et reproductibles. Ils ont bénéficié des progrès récents dans les domaines des matériaux et des techniques de fabrication, en particulier l'impression 3D et la bio-impression. Ils permettent de réaliser sur puce des modèles biologiques 3D, permettant la formation et la croissance d'organoïdes dans un environnement contrôlé proche de celui de l'organisme réel. En parallèle de la maîtrise des conditions biologiques de développement, les travaux se concentrent sur le contrôle et l'analyse dynamique des paramètres de culture et des facteurs biochimiques sécrétés. Du point de vue technologique, l'enjeu consiste à reproduire la vascularisation micro-fluidique de l'organe, ainsi que les propriétés physiques, biochimiques et topographiques de la matrice extracellulaire. Il peut s'agir également de stimuler mécaniquement l'assemblage cellulaire pendant sa croissance et sa différenciation, ou alors de réaliser des matrices «4D» qui évolueront au cours du développement des organoïdes qu'elles supportent. Ces systèmes micro-physiologiques sont appelés à servir de base à des recherches fondamentales comme les mécanismes d'initiation de maladies telles les cancers, ou les facteurs menant au développement et à la progression des tumeurs. Egalement, ils ouvrent la voie à la médecine régénérative par la reconstruction d'assemblages cellulaires capables d'assurer la fonction d'un organe, et ceux-ci pourront par ailleurs être utilisés pour des essais thérapeutiques dans le cadre de la pharmacologie et de la médecine personnalisée.

II. Énergie électrique

La part de l'électricité dans le mix énergétique global est incontestablement en forte croissance. Les projections estiment une croissance de 60 % entre 2016 et 2040 de la consommation de cette forme d'énergie finale. Cette forte augmentation tient au fait que l'énergie électrique peut satisfaire tous les services énergétiques avec des performances inégalées du fait de la contrôlabilité et de l'efficacité des dispositifs de conversion. L'énergie électrique a cependant actuellement un défaut de taille, au plan mondial, puisqu'elle est issue actuellement à près de 80 % de ressources primaires non renouvelables qui sont très souvent très polluantes (43 % de la production électrique était générée en 2016 par des centrales à charbon). Toutefois, dans le même temps, elle est également la forme d'énergie finale qui présente le plus grand potentiel de génération à partir de ressources renouvelables. Elle a donc la capacité de constituer un puissant moteur de développement durable.

Dans cette dynamique de forte croissance, les systèmes de motorisation électriques industriels représentent un tiers de l'augmentation de la demande d'énergie. En parallèle, l'augmentation du niveau de vie global signifie que des millions de ménages acquièrent des appareils électriques (avec une part croissante d'appareils connectés) et installent des systèmes de refroidissement. Notons également dans la projection globale, la montée en puissance des initiatives sectorielles et du soutien politique dans le domaine des transports poussant, par exemple, les prévisions pour le parc mondial de voitures électriques à 280 millions d'ici à 2040, contre 2 millions aujourd'hui. L'utilisation croissante des technologies numériques dans l'ensemble de l'économie est également une évidence. Ces technologies facilitent en particulier le fonctionnement flexible des systèmes électriques, mais contribuent de manière significative à

l'augmentation de la consommation électrique.

L'ampleur des futurs besoins en électricité et le défi de la décarbonation du bilan énergétique (ou du mix énergétique) expliquent pourquoi les investissements mondiaux dans l'électricité ont dépassé ceux du pétrole et du gaz pour la première fois en 2016.

Pour ces raisons, les recherches en génie électrique au niveau mondial sont très largement orientées par les fortes préoccupations sociétales actuelles. Ainsi, transports électriques, bâtiments intelligents, micro-réseaux, écoquartiers, villes intelligentes et sites autonomes sont devenus des terrains de recherche de la communauté scientifique.

A. Réseaux d'énergie

Les infrastructures électriques vivent un profond changement de paradigme, avec notamment l'arrivée massive de sources peu prévisibles et à haute variabilité et l'arrivée de nouveaux acteurs dans le domaine de la gestion et de la distribution de l'énergie électrique. Les activités de recherche sur ces thèmes vont de la modélisation de ces nouveaux réseaux pour le contrôle et le diagnostic, leur dimensionnement et leur optimisation technico-économique en prenant en compte la possible hybridation des sources, jusqu'au contrôle et la supervision de ces réseaux hautement flexibles à tout niveau (sources, charges, stockage) et possiblement de nature diverse et potentiellement fortement couplée (électrique, thermique, hydrogène, etc.). Parmi les problématiques émergentes, citons en particulier les études dans les domaines suivants : le contrôle de systèmes multi-sources et multi-niveaux décisionnels, l'intégration forte des énergies renouvelables et des véhicules électriques dans les réseaux électriques, et la stabilité et la protection de ces réseaux. Sur ces thématiques, on note une convergence des technologies de l'information et de la communication avec celles

de l'énergie électrique. En effet, associées à la très grande complexité des données et à leur caractère fortement stochastique, de nouvelles questions émergent et sont traitées, notamment en collaboration avec les domaines des mathématiques appliquées et des STIC, par les chercheurs du génie électrique. Citons également des activités de recherche croissantes dans le domaine des réseaux haute tension à courant continu (HVDC) avec en particulier l'émergence de convertisseurs électroniques de puissance dédiés à ces applications (convertisseurs modulaires multi-niveaux : MMC) et les études sur les matériaux diélectriques associés à ce type de réseau. Une autre problématique majeure concerne la durée de vie des installations dédiées, 30 ans pour une installation éolienne par exemple.

B. Stockage et grappillage d'énergie

La pénétration du vecteur électricité s'accroît également dans les applications embarquées à différents niveaux de puissance. D'une part, la propulsion de véhicules terrestres, maritimes, et aéronautiques pour les puissances élevées, d'autre part les dispositifs nomades et connectés pour les faibles puissances. Dans ces systèmes les contraintes sont majoritairement liées à la masse, la fiabilité, l'efficacité... L'alimentation autonome en énergie de dispositifs électroniques, comme les capteurs communicants, conduit à rechercher de nouvelles solutions de « grappillage énergétique » et de stockage d'énergie. On retrouve ainsi les problématiques décrites dans le cadre des nano et micro-systèmes, liées au développement de dispositifs énergétiques (récupération, stockage et gestion de l'énergie) à faible coût et à faible impact environnemental fabriqués par des techniques de micro- et nanofabrication à basse dimensionnalité (nano-structuration, matériaux électro-actifs, magnéto-actifs, électro-thermiques, magnéto-thermiques...).

C. Électronique de puissance

La contrôlabilité et l'efficacité des dispositifs de conversion électrique actuels tiennent en grande partie aux progrès réalisés en électronique de puissance. Pour ces dispositifs, les exigences de compacité, de rendement et de fiabilité sous-tendent de nombreuses activités. L'émergence des composants à semi-conducteur à grand gap, en particulier, soulève actuellement de nombreuses questions d'ordre scientifique et technologique en matière de compatibilité électromagnétique (CEM), d'intégration, d'architectures de conversion, de montée en tension et de montée en température de fonctionnement. La problématique de la fiabilité de ces nouveaux composants est un point particulièrement crucial dans le contexte d'une intégration poussée et de composants technologiquement complexes soumis à de fortes sollicitations dans des régimes de fonctionnement extrêmes ou fortement cyclés thermiquement. La multiplication des structures électroniques de conversion de puissance dans des systèmes de plus en plus complexes s'accompagne également de problématiques liées au contrôle. Il s'agit en particulier de gérer de façon optimale les transferts d'énergie en assurant une continuité de service nécessitant des fonctions de diagnostic, tant pour effectuer des reconfigurations que pour planifier des maintenances.

D. Actionneurs bio-compatibles

De nombreux travaux sur les actionneurs s'orientent vers une descente d'échelle, notamment à l'interface avec le vivant et le transfert d'énergie sans contact, rejoignant les problématiques déjà évoquées (dont les actionneurs bio-compatibles) dans le cadre des nano et micro-systèmes. Un champ important de recherche a ainsi émergé il y a quelques années, avec notamment la modélisation et l'étude des interactions entre les champs électromagnétiques et la « matière vivante ».

E. Actionneurs électromécaniques

Les chaînes de conversion électromécanique d'énergie constituent une activité historique du génie électrique. Ce thème est en évolution et s'oriente actuellement vers de nouvelles structures électromagnétiques pour la génération d'énergie ou l'actionnement soumis à des problématiques de réduction vibratoire, de fonctionnement à haute température ou de très haute fréquence de rotation. Ces travaux portent également sur des ensembles convertisseurs-machines à haute tolérance de défaillance, avec des considérations de dimensionnement sur cycle et de compatibilité électromagnétique (CEM). Dans ce domaine émergent également de nouveaux procédés basés sur la fabrication additive.

F. Systèmes de conversion électrochimique

Outre les traditionnelles voies de conversion électromécanique (magnétique, piézoélectrique...) ou de conversion par électronique de puissance, les systèmes de conversion électrochimique pénètrent fortement le génie électrique. En effet, la variabilité des sources et des charges, de même que les applications embarquées nécessitent le développement de solutions de stockage sûres, propres et efficaces menant ainsi à des travaux sur l'intégration des supercondensateurs, des accumulateurs électrochimiques, des piles à combustibles, des électrolyseurs. Ces dispositifs sont complémentaires car ils visent des dynamiques et des horizons temporels de stockage différents. Les activités portent sur la caractérisation, le diagnostic et le pronostic de l'état de santé, le dimensionnement et la gestion de l'énergie transitant dans ces dispositifs de stockage avec prise en compte du vieillissement. Dans cet ensemble, le vecteur hydrogène ou hydrogène-énergie occupe une

place importante car il permet d'envisager un stockage de masse de long terme, ce que ne permettent pas les supercondensateurs et les accumulateurs. La versatilité de son usage permet aussi des couplages avec d'autres flux énergétiques, notamment les flux thermiques et la plurigénération (électricité, chaleur, froid par exemple) ou la conversion du dioxyde de carbone en méthane *power to gas*.

G. Matériaux pour l'énergie électrique

L'évolution des performances des matériaux joue également un rôle considérable dans le traitement de l'énergie électrique. Dans ce domaine les activités du génie électrique se portent historiquement sur les matériaux magnétiques, les matériaux diélectriques, les isolants ou bien encore sur les interfaces entre matériaux dans les contacts électriques. Elles concernent en particulier la caractérisation en termes de performances électriques et énergétiques. Il s'agit en particulier de développer des modèles permettant de prédire les performances des matériaux, de modéliser leurs pertes et/ou d'étudier les mécanismes de détérioration. Citons par exemple les nombreux travaux sur les matériaux magnétiques doux et durs (aimants) pour en accroître les performances environnementales et la compacité (utilisation de matériaux abondants, recyclables et/ou dont l'extraction et le raffinement sont à faible impact sur l'environnement), comme par exemple les travaux relatifs à des matériaux magnétiques durs sans terres rares ni métaux stratégiques comme le cobalt. Des travaux récents portent également sur l'exploitation de propriétés multiphysiques de certains matériaux comme les matériaux électrocaloriques ou magnéto-caloriques avec des applications directes en matière de refroidissement ou de réfrigération.

H. Outils méthodologiques

La modélisation et les méthodes numériques jouent un rôle essentiel d'accompagnement des démarches de conception et d'optimisation. Les thématiques traitées dans ce domaine concernent la modélisation de phénomènes multi-physiques fortement couplés, les approches multi-échelles et la réduction de modèle dans le cas de systèmes complexes.

Du point de vue de l'optimisation et de l'éco-conception, comme pour l'ensemble des sciences de l'ingénieur, les évolutions des contraintes nécessitent d'introduire de nouveaux concepts et d'optimiser les dimensionnements des chaînes de conversion pour réduire encombrement, masse, coûts, chauffements tout en améliorant encore l'efficacité énergétique, la réduction des pollutions (électromagnétiques, acoustiques, vibratoires, environnementales...) ou encore la tenue aux environnements extrêmes. Dans ce contexte, il est fondamental de comprendre en détails et de maîtriser les processus de vieillissement pour éco-concevoir les systèmes électriques durables pour le futur.

III. Electromagnétisme et ondes, antennes

Le domaine des ondes comprend les ondes électromagnétiques, l'optique et une partie des ondes acoustiques. Si des concepts sont communs aux trois disciplines depuis de nombreuses années, de nouvelles idées ont émergé et ont été explorées dans les trois domaines. Cependant, les techniques, les instrumentations associées et les sujets de recherche sont différents. Il faut aussi tenir compte du fait que de nombreuses applications font appel aux différents types d'ondes sans s'y référer spécifiquement. Il existe de ce fait de nombreuses

interactions avec d'autres domaines relevant de la section 08 comme la photonique, les micro- et nanosystèmes, l'électronique millimétrique et THz, ce qui conduit à des approches multi-physiques.

A. Modélisation électromagnétique et méthodes numériques

Plusieurs concepts ou applications sont à l'origine des recherches concernant les ondes électromagnétiques. Parmi ceux-ci, des travaux importants ont été conduits d'une part sur la base de méta-matériaux ou de méta-surfaces, et d'autre part par le développement de nombreuses communications radio liées au développement des objets connectés et nomades, et des liaisons spatiales. Dans ce contexte où les ondes électromagnétiques ont vu leur utilisation augmenter continuellement, les interactions ondes-vivant constituent également l'un des sujets de recherche en développement. Tous ces travaux passent par des phases faisant appel aux outils numériques de simulation pour la compréhension des phénomènes ou pour la conception de nouveaux objets.

Dans le domaine des ondes, les méthodes numériques sont des outils indispensables. Même si l'on doit tenir compte du caractère spécifique de l'onde (optique, électromagnétique ou acoustique), la modélisation électromagnétique reste au cœur des travaux menés dans différents domaines comme la compatibilité électromagnétique (CEM), l'intégrité des circuits, la sécurité des systèmes de communication, ou plus largement dans le domaine des composants (filtrage spatial et/ou spectral par exemple).

Les méthodes numériques reposant sur des maillages de l'espace (différences finies, éléments finis, intégrale volumique ou intégrale surfacique), qui étaient *a priori* considérées comme « gourmandes » en moyens de calcul,

sont maintenant largement utilisées avec la montée en puissance de ces moyens, tant en mémoire qu'en vitesse. Les techniques de modélisation basées sur l'homogénéisation ou sur la notion de milieux effectifs sont maintenant sophistiquées et leur domaine de validation les rend exploitables. Elles sont utilisées dans les domaines des cristaux photoniques, des méta-matériaux et des méta-surfaces.

Un défi de la modélisation numérique concerne la propagation des ondes dans les milieux désordonnés et dans de très grands volumes (sondage radar de la biomasse, analyse optique de tissus vivants), où il faut arriver à extraire l'information utile de signaux complexes. Plusieurs travaux sont dédiés à la transition entre les équations d'ondes et les équations de diffusion & transport, qui peuvent être source de simplification. Il faut également signaler les outils d'analyse spectrale et d'analyse complexe, qui s'appuient sur les modes de résonances et sur l'exploitation des représentations spectrales et des prolongements analytiques (PMLs : Perfectly Matched Layers, extrapolation et représentation de grandeurs physiques). D'autres travaux en émergence concernent des méthodes numériques d'ingénierie inversée (*reverse engineering*) basées sur des algorithmes de type « apprentissage automatique » (ou *machine learning*) qui pourraient s'avérer prometteuses, à la fois pour l'imagerie inverse et la synthèse de composants.

B. Rayonnement et antennes

L'utilisation des ondes électromagnétiques pour les communications est en forte croissance. Si les antennes sont étudiées depuis de nombreuses années, les travaux concernant ces composants sont d'une importance capitale dans un contexte de réduction de la consommation énergétique, de limitation de la pollution électromagnétique, de mobilité des objets et des utilisateurs, et au final d'une meilleure qualité des transmissions radiofréquences. Ces composants sont aussi utilisés dans les appli-

cations d'imagerie micro-ondes et jusqu'au THz.

L'activité de recherche actuelle focalise essentiellement ses efforts sur la définition de nouveaux systèmes rayonnants, et ce pour une multitude d'applications en pleine expansion et à impact sociétal majeur (futurs réseaux 5G, méga-constellations de satellites, IoT -Internet of Thing, IoE-Internet of Everything), pour les communications très haut débit, la connectivité en tout point, la sécurité, la défense, la santé, l'imagerie et le bien-être. On peut distinguer deux grandes familles de travaux :

– *architectures antennaires millimétriques et au-delà*. L'état de l'art des solutions à base de réseaux repose sur des formateurs de faisceaux à base de systèmes quasi-optiques, de réseaux réflecteurs et de réseaux transmetteurs dont les efficacités en rayonnement sont très élevées grâce à leur alimentation par ondes d'espace, de réseaux d'antennes à balayage électronique à large bande et large champ de vision angulaire, et de méta-surfaces qui offrent des avantages uniques en termes de compacité et de simplicité d'excitation. Ces solutions nécessitent de mettre en synergie des outils avancés d'analyse électromagnétique et de nouvelles techniques de fabrication (diffusion bonding, circuits imprimés multi-couches haute densité, impression 3D, SIW-Substrate Integrated Waveguide, micro-usinage).

– *Antennes miniatures et ultra-miniatures*. La conception et le développement des antennes miniatures, des antennes intégrées sur des supports non standard (textile, polymères ultra-souples...), des antennes reconfigurables, et des sources large bande ou multi-bandes est aujourd'hui indispensable pour de nombreuses technologies ou applications (RFID, radio cognitive, Internet des Objets, informatique ubiquitaire, villes intelligentes, Green IT...). Parmi les nombreux défis à relever, on peut souligner le nécessaire développement des systèmes complexes d'antennes miniaturisées directives, voire super-directives, à formation de multifaisceaux reconfigurables, utilisant des méta-matériaux et méta-surfaces et fonctionnant sur plusieurs bandes de fré-

quences de façon à occuper et façonner de manière optimale le volume du support 5G tout en repoussant les limites de nouvelles techniques pour la formation de faisceaux d'antennes compactes. Les applications envisagées sont les systèmes communicants embarqués compacts, les systèmes compacts pour la focalisation électromagnétique en champ proche et la réalisation de systèmes de lentilles planaires à fréquences quasi optiques.

C. Compatibilité électromagnétique

Le domaine des travaux sur la CEM est large tant sur le plan fréquentiel que sur celui des applications. Plusieurs sujets sont au cœur de cette thématique :

- la modélisation des interactions onde-structure afin de développer des outils pertinents pour l'étude des menaces envers la sécurité des systèmes électriques et électroniques ;

- la conception CEM liée à l'intégration d'électroniques complexes, particulièrement dans le contexte de systèmes modulaires et de plus en plus autonomes, qui évolue vers l'analyse de risque. La modélisation probabiliste de ce risque deviendra un pivot de la modélisation CEM ;

- le test CEM encadré par des normes actuelles définissant des contraintes, normes qui devront évoluer pour tenir compte des nouveaux usages et de la vulnérabilité aux attaques électromagnétiques des systèmes ;

- le domaine des transports autonomes (avions, chemin de fer, automobiles) exploite des bandes de fréquences de plus en plus étendues, ce qui nécessite de combiner différentes approches reposant tant sur la modélisation que l'expérimentation. Les défis dans ce domaine sont de parvenir à une simulation globale des moyens de transport connectés et communicants, passant par une co-simulation des différents éléments composant le véhicule.

D. Ondes acoustiques

Les techniques de transformation d'espace ont positionné les méta-matériaux comme un paradigme dominant pour contrôler les écoulements de flux en géométrie arbitraire, incluant les effets de mimétisme, illusion et invisibilité. Surtout concentrées sur les ondes électromagnétiques à l'origine, ces techniques ont essaimé vers l'acoustique à toutes les échelles.

Les orientations et les thèmes émergents dans le domaine de l'acoustique au niveau de la section 08 sont :

- le développement de méta-matériaux sensibles à des stimuli externes, qu'il s'agisse d'un champ électromagnétique externe pour obtenir une réponse accordable ou d'une commande optique des propriétés acoustiques pour créer des cristaux spatio-temporels ;

- l'instrumentation ultrasonore pour environnement à fortes contraintes (nucléaire, chimiques...);

- la caractérisation ultrasonore qui se porte vers des structures de tailles micrométriques avec des techniques de microscopie acoustique ;

- l'étude des structures périodiques intégrant des matériaux piézoélectriques (cristaux phononiques) pour réaliser des cellules élémentaires, l'exploitation de la distribution spatiale de ces cellules élémentaires et leur couplage via la diffusion multiple (réalisation de la première lentille plate pour l'acoustique).

Les enjeux sociétaux et les attentes restent très importants dans le domaine des ondes. Les laboratoires relevant partiellement ou totalement de la section 08 sont aujourd'hui, dans la plupart des domaines mentionnés, au meilleur niveau international. Parmi les points en émergence on soulignera : les développements dans le domaine de la modélisation et de la simulation numérique, les interactions avec le vivant, les éléments rayonnants et les rayonnements.

IV. Photonique

La photonique remplit une multitude de fonctions, multiphysiques et multiéchelles, passives et actives, à visée applicative ou fondamentale, spécialisée ou interdisciplinaire. Son évolution est fortement marquée par une tendance à l'intégration et à l'exploitation de couplages multiphysiques ou résonants, alimentés par l'exploration de nouveaux matériaux (semiconducteurs, oxydes, 2D, "méta-..."...) et de nouveaux concepts d'architectures (topologiques, chirales, hyperboliques, désordonnés...).

A. Photonique intégrée et hybride, télécoms

Le développement actuel des PICs (circuits photoniques intégrés) s'appuie fortement sur les acquis en technique d'hybridation locale par report (oxydes fonctionnels piézo-électriques, thermo-optiques, magnéto-optiques...), par croissance localisée, ainsi que par dépôts colloïdaux ou polymères (boîtes quantiques, émetteurs organiques...), ou avec fonctionnalisation par matériaux 2D (graphène, chalcogénure...) ou non-linéaires, principalement développés sur la plateforme silicium ou SOI (silicium sur isolant). De manière générale la photonique intégrée est aujourd'hui concernée par une grande gamme de fréquences, de la photonique visible et des apparences jusqu'au THz en passant par le proche (NIR) et moyen (MIR) infra-rouge. Les retombées les plus marquantes concernent les sources de lumière, d'une part à base de structures «localement» hybrides de III-V sur silicium, d'autre part avec des empilements épitaxiés (intégration monolithique) maîtrisant la qualité cristalline des couches (Ge, SiGe contraints, antimoineures, oxydes, ZnO, GaN...). Egalement, une plateforme d'intégration prometteuse pour l'optique non-linéaire et transparente se développe avec les substrats hybrides en couche

mince de niobate de lithium. Les guides optiques eux-mêmes évoluent et sont composés de nanostructures (guides silicium sub-longueurs d'ondes, guides plasmoniques, guides à plasmons localisés, nanofils) afin de préparer notamment la photonique intégrée sur substrat flexible. Les dispositifs et circuits réalisés sont compacts et/ou embarquables associant plusieurs fonctions en série ou en parallèle comme les spectromètres intégrés avec capteurs associés, le couplage accéléromètres MEMS et atomique, les horloges optiques & peignes de fréquences ultrastables, le lidar pour voiture autonome, l'interférométrie basée sur des architectures piégées, intégrée avec moyen d'analyse (Raman/Brillouin sur puce...). D'autres systèmes réalisent des fonctions complexes faisant appel au calcul optique ou neuromorphique, à la convergence calcul/mémoire/communication, à la cryptographie et photonique quantique sur puce.

En complément du graphène, les matériaux 2D tels que les dichalcogénides de métaux de transition (TMDC) et le nitrure de bore hexagonal (hBN) présentent un fort potentiel pour générer des polaritons (excitons dans le TMDC, phonons dans l'hBN, plasmons dans le graphène) et peuvent s'empiler pour former des hétérostructures de Van der Waals, ce qui peut ouvrir la voie à des circuits photoniques intégrés polaritoniques, pour de l'optique diffractive, des matériaux hyperboliques, et des structures photoniques topologiques. En parallèle les télécoms continuent leur évolution vers les très hauts débits et densités d'échanges de données en exploitant de nouveaux multiplexages de signaux, et tout particulièrement le guidage multimode qui vient renforcer et compléter les évolutions précédentes autour du multiplexage de signaux modulés en phase et en polarisation. Cela ouvre un nouvel axe de la photonique guidée et/ou intégrée multimode, active et passive, qui consolide actuellement le «bimode» avant d'explorer l'enrichissement modal spatial: superposition de modes spatiaux, modes orbitaux angulaires... Les nouveaux systèmes télécoms optiques cherchent également à exploiter les traitements quantiques ou neuromorphiques de l'information, ainsi

que les optimisations basées sur les techniques d'apprentissage.

Le domaine des fibres optiques contribue à ces évolutions avec le développement de fibres multicoeurs et/ou multimodes, pour les transmissions de nouveaux formats de signaux, pour l'optique non-linéaire (notamment la génération de peignes de fréquence), pour des fonctions de capteurs ou pour une nouvelle génération de sources (fibres à cristal photonique et coeurs creux, remplis de gaz).

B. Couches minces optiques, cristaux photoniques, nano-résonateurs, nano-antennes, méta-matériaux, méta-surfaces, milieux désordonnés

Les multicouches optiques (ou filtres interférentiels) ont atteint un niveau de maturité élevé pour les applications en espace libre, pour des applications allant du spatial à la défense, l'observation de la terre, les télécommunications optiques... Les domaines spectraux ont été considérablement étendus (des rayons X au moyen infra-rouge) et motivent une recherche pour de nouveaux matériaux dont la pérennité et la compatibilité écologique doivent être garanties. Des efforts considérables sont également consentis pour un contrôle additionnel de la dispersion de phase, pour la réduction des pertes jusqu'à des valeurs inférieures à un milliardième du flux incident, et pour le contrôle des propriétés non-optiques. On note enfin que les spécifications exigeantes (dont le bruit thermomécanique, la diffusion lumineuse et l'uniformité de matière, ou la pixellisation des composants pour les matrices de détecteurs) imposées pour le bon fonctionnement des systèmes dévolus à la détection des ondes gravitationnelles, ou spécifiques des systèmes pour le multiplexage spatial, ne manqueront pas de porter encore cette activité vers de nouvelles ruptures technologiques.

Pour le contrôle tridimensionnel de la lumière, voire pour les applications en champ proche, les cristaux photoniques demeurent une solution clé pour contrôler l'onde électromagnétique. Pour accroître l'efficacité de l'interaction lumière-matière, en particulier pour des exaltations « large-bande » ou dans le cas d'objets isolés (de type nano-antennes), les résonateurs mêlant nano-cavités plasmoniques et diélectriques constituent aujourd'hui le cœur de nombreux micro-systèmes opto-électroniques ou opto-mécaniques pour des applications dévolues aux capteurs et au sondage (localisé, global) du vivant, ou à la définition de micro-sources classiques ou quantiques. Les (nano-)sources thermiques, ou la thermo-photonique, viennent également enrichir ces fonctionnalités.

Les méta-matériaux sont venus compléter cette panoplie de composants en introduisant de nouveaux degrés de liberté comme les indices « anormaux » (négatifs, nuls...), et en apportant de nouvelles techniques de synthèse autorisant le contrôle arbitraire de flux en géométrie complexe, dont la création d'illusions (mimétisme, invisibilité) est un exemple phare. Si ces techniques ont largement diffusé dans d'autres domaines (micro-ondes, acoustique, mécanique, hydrodynamique, sismique, thermique... et plus récemment dans l'utilisation clinique de l'imagerie par résonance magnétique), elles doivent cependant faire face, dans le domaine de l'optique, à une problématique de contrôle de dispersion, et à l'élaboration de nouveaux matériaux inhomogènes anisotropes. Dans ce contexte, les procédés d'homogénéisation pourraient apporter des réponses très attendues. Parallèlement les méta-surfaces proposent une alternative majeure pour pallier ces difficultés, notamment eu égard à leur facilité (relative) de fabrication. Ces derniers composants ont atteint en peu de temps une maturité remarquable pour le contrôle de la lumière (phase, amplitude, polarisation, hélicité, moment optique) et devraient rapidement être étendus à un contrôle spectral (simultané).

Enfin, parallèlement à ces développements s'appuyant sur une structuration (ou un gra-

dient) de la matière, on assiste à l'émergence d'une véritable ingénierie du désordre, qui consiste en particulier à extraire, imager ou transporter une information à travers un milieu complexe (ou trouble, ou diffusant). Un grand nombre d'idées ambitieuses, théoriques, numériques ou expérimentales, ou relevant de l'optique statistique, ont été explorées et affichent un succès remarquable qui devrait s'accroître rapidement, avec des applications potentielles phare (médecine, vivant, navigation, sécurité...). On note également l'utilisation d'effets collectifs (dont l'auto-organisation) dans ces structures désordonnées pour élaborer de nouvelles fonctions de filtrage et de codage.

C. Bio-détection, imagerie, application vivant

Les techniques de détection optique appliquées à la biologie ou au vivant sont intrinsèquement des thématiques interdisciplinaires, largement utilisées dans des domaines fondamentaux et appliqués. Les bio-détecteurs ou bio-capteurs rencontrent de grands défis pour combiner sélectivité, sensibilité, intégrabilité ou implantabilité, diversité et bas coût. Dans ce contexte, le sondage du vivant tire activement profit de chaque avancée en photonique (composants, systèmes et traitement numérique), en parallèle du développement de bio-indicateurs ou bio-marqueurs.

L'imagerie optique pour la biologie rencontre elle aussi des défis importants, notamment pour quantifier des propriétés physiques/chimiques/biologiques intriquées et complexes, à haute résolution temporelle et spatiale, et sur de larges échelles. Elle doit également aujourd'hui répondre à des questions biologiques (développement, adhésions, trafic cellulaire...) et biomédicales (neurosciences, tissus cancéreux, virologie/immunologie...) de plus en plus ambitieuses. Certaines directions principales mais non exhaustives, pour répondre à ces défis, sont l'imagerie fonc-

tionnelle et quantitative, l'imagerie en profondeur et sans marquage basée sur des concepts d'optique non-linéaire pouvant avoir des spécificités chimiques, l'imagerie super résolue, l'imagerie intelligente qui se base sur de nouveaux couplages entre analyse et mesure – comme la co-conception de l'imageur et de l'analyse exploitant des algorithmes d'apprentissage profond. Les systèmes endoscopiques restent un mode de développement de ces différentes techniques.

D. Sources, et composants actifs associés

La réalisation de nouvelles sources de lumière connaît actuellement un essor considérable. De nombreuses ruptures technologiques ont eu lieu dans des domaines aussi divers que les lasers de très haute puissance, domaine qui a été distingué par le prix Nobel de physique en 2018, les sources de lumière non classiques pour les technologies quantiques, les sources attoseconde, les sources électriques de plasmons, les sources de rayonnement infrarouge ou THz...

Les futurs développements dans ces domaines s'orientent ainsi vers plusieurs axes, comme par exemple l'extension des gammes de longueurs d'onde :

– des projets ambitieux visent à améliorer les sources XUV et les technologies des sources attoseconde vers des sources haute cadence et compactes en alternative aux grands instruments. Des développements technologiques importants sont à réaliser, conjointement au domaine de l'optique ultrarapide (sources au cycle optique, à haute puissance moyenne) ou d'un point de vue applicatif à l'électronique PHz.

– l'extension vers le moyen infrarouge (MIR) implique des systèmes variés tels que les lasers à cascade quantique, les sources à base de nouveaux matériaux et d'effets paramétriques, les fibres non-linéaires adaptées à

ces fréquences et des sources à haut rendement et faible consommation, intégrables et accordables. Le domaine s'attache à développer toutes les fonctionnalités requises, actives (sources, détecteurs, modulateurs) et passives (filtres, résonateurs, guides), en s'appuyant principalement sur différentes plateformes d'intégration combinées avec de l'hétéroépitaxie (GeSn contraint, GaInAsSb) ou des matériaux 2D. Les objectifs concernent principalement l'imagerie et la spectroscopie, à base de peignes de fréquences (générés optiquement ou électriquement), ou exploitant des effets optomécaniques, photoacoustiques.

– le domaine du THz se situe à l'interface entre l'électronique haute fréquence et le MIR et est en passe d'atteindre un fonctionnement 'haute température' pour des sources de puissance suffisante, utilisant des lasers à cascade quantique (QCL) THz, des photomixeurs (émetteurs et détecteurs rapides), ou des sources pulsées (non-linéarités dans des systèmes excitoniques, rectification optiques, matériaux 2D), et pour d'autres fonctions à base de concepts innovants d'excitation collective (spintronique THz, laser THz à polariton). Comme pour le MIR, la tendance est à l'intégration sur Silicium avec des défis liés aux dimensions, et les applications concernent non seulement la spectroscopie, l'imagerie et le biomédical (y compris la manipulation d'objets biologiques), mais aussi les nouvelles générations de télécommunication sans fil qui nécessitent des émetteurs-récepteurs THz intégrés avec source, modulateur, diodes rapides, réseau d'antennes avec contrôle de faisceaux.

Un autre exemple concerne la manipulation des faisceaux. La génération de nouvelles sources de lumière doit être accompagnée par des techniques de contrôle et de manipulation des faisceaux dans les domaines spatial, temporel ou spectral (réduction des bruits notamment pour la détection d'ondes gravitationnelles (VIRGO/LIGO), systèmes pour horloges atomiques, lasers de quelques cycles, holographie temporelle, couplages spatio-temporels en régime non-linéaire intense ou combinaison cohérente de faisceaux...). Les manipulations de la lumière incluent enfin les développe-

ments de systèmes utilisant de la co-conception et l'intelligence artificielle.

E. Optique quantique, interférométrie atomique

On assiste également à une convergence de l'optique quantique et des nanotechnologies, qui devrait accélérer la mise en oeuvre des futures technologies quantiques. Les travaux sur les horloges intégrées, les instruments de métrologie ainsi que sur les systèmes pour la cryptographie quantique ont en perspective cette intégration. L'optique quantique intégrée connaît ainsi des développements considérables avec une maturité applicative remarquée. Les protocoles de cryptographie quantique en variables continues peuvent aujourd'hui être mis en oeuvre sur différentes plateformes de photonique, et des plateformes de nanophotonique silicium permettent d'effectuer du boson sampling. Pour un autre champ d'application, les interféromètres atomiques constituent des solutions pour une nouvelle génération de capteurs inertiels (gravitomètres, gyromètres, accéléromètres) ou pour le développement de grands instruments de physique fondamentale (ondes gravitationnelles, métrologie spatiale).

V. Électronique

Le domaine de la microélectronique connaît aujourd'hui une mutation importante avec les technologies silicium nanométriques et la difficulté pour diminuer plus encore la taille des transistors. De plus, les coûts de ces technologies sont tels que peu d'entreprises au niveau mondial sont en mesure d'investir dans ces unités de fabrication. Les travaux menés dans ce domaine connaissent de ce fait une évolution importante avec l'introduction de

concepts comme l'utilisation de la troisième dimension, l'hétérogénéité des objets et des technologies intégrées sur un même support silicium ou non. Les travaux qui accompagnent cette mutation technologique concernent aussi la réduction de la consommation des circuits, la gestion du budget thermique, l'étude de packages adaptés. Parallèlement, l'introduction de matériaux organiques et hybrides permet le développement de composants et de systèmes à faible empreinte environnementale, en particulier pour les applications bio.

La « digitalisation » de la société est sans aucun doute la quatrième révolution industrielle. De nouveaux défis sociétaux font leur apparition comme l'industrie du futur, l'e-santé, et les « smart-cities » qui ont un impact majeur sur la conception des circuits et des systèmes embarqués (au sens électronique et informatique), supports indispensables de ce monde numérique. La conception de ces systèmes fait face à des exigences de temps de développement, de performances – en tout premier lieu d'efficacité énergétique, de fiabilité, de résilience et de sécurité. Les nouveaux enjeux et nouvelles applications nécessitent également l'intégration, en plus du ou des cœurs de calcul, de capteurs et actionneurs innovants. On parle alors de systèmes cyber-physiques (CPS: Cyber-Physical Systems). Cette numérisation s'appuie sur le nomadisme permettant à chacun d'accéder à un espace numérique ambiant et requiert des développements en communication numérique, afin de gérer les canaux de communication avec un nombre d'objets communicants dépassant plusieurs milliards. Cet ensemble distribué devra de fait s'adapter et évoluer de façon plus ou moins autonome, en s'appuyant alors sur l'intelligence artificielle.

A. Nouvelles technologies, nouveaux paradigmes

Les technologies micro-nanoélectroniques permettent de réaliser des fonctions de calcul

(nanofils, nanotubes, SET, etc.), de mémorisation (MRAM, ReRAM, etc.) ou de communication (nanophotonique, spin, terahertz, optique visible, etc.) dont les impacts sur les futurs systèmes sont attendus en termes d'efficacité énergétique, de puissance de calcul et de robustesse (fiabilité et sécurité) des systèmes sur puce (SoC). Bien entendu, ces attentes s'avèrent importantes dans le cadre des paradigmes conventionnels de calcul. Par exemple, les mémoires magnétiques (STT RAM, SOT RAM...) et résistives (OxRAM, PCM RAM, MottRAM) sont plus que jamais pertinentes industriellement, d'autant plus qu'elles se complètent parfaitement avec les technologies CMOS FD SOI et FinFET.

Les approches d'intégration hétérogène tridimensionnelle pour ces mémoires intégrés dans le Back-End-Of-Line (OxRAM, MRAM) et l'amélioration des performances des sélecteurs (vitesse, compacité, surcoût énergétique) sont aujourd'hui largement admises mais les solutions d'avenir ne sont pas encore disponibles en Europe ; d'autres approches plus prospectives telles que l'intégration de matériaux ferroélectriques dans le Front-End-Of-Line pourront autoriser des stratégies de calcul plus agressives en termes de budget performances/consommation, ainsi que des supports matériels pour l'intelligence artificielle.

De façon plus prospective, ces évolutions technologiques ainsi que celles en photonique sur silicium, en spintronique (spin-orbitronique) ou en calcul quantique ouvrent également la voie à de nouvelles architectures basées sur des paradigmes plus en rupture.

Le déploiement de ces nouveaux paradigmes de calcul comme la logique multi niveaux, le calcul approximatif, asynchrone, neuro-inspiré..., s'anticipe en tirant profit des propriétés innovantes des technologies émergentes. Dans ce cadre, une réflexion sur les paradigmes en rupture qui entraînent des convergences calcul/mémoire, calcul/communication et mémoire/communication est menée. Les technologies ainsi développées doivent donc être évaluées pour déterminer leur degré de maturité et anticiper leur intégration dans les circuits par le développement

de modèles compacts et l'évaluation de leur niveau de fiabilité.

Par ailleurs, de nouveaux langages et mode de stockage de l'information basés sur la programmation moléculaire ont vu le jour. Ils constituent un nouveau paradigme basé sur la synthèse de l'ADN dont la réplication peut être contrôlée de façon spatio-temporelle par des réactions enzymatiques. Ce nouveau champ scientifique repose ainsi sur des approches computationnelles, mais aussi biochimiques tout en utilisant les technologies microfluidiques pour former les micro-réacteurs comparantimentalisant les réactions.

Outre la possibilité d'implanter des fonctions logiques, ce langage de programmation moléculaire irrigue d'autres thématiques de recherches touchant le vivant, visant par exemple à mieux comprendre l'émergence de l'ordre au cours des processus de morphogenèse, ou encore à fabriquer des matériaux auto-organisés capable de créer des interfaces dynamiques avec le vivant. Les réseaux de réaction complexes formés à partir d'acides nucléiques synthétiques ont également des applications en diagnostic moléculaire.

B. Edge computing

La volonté de réduire l'empreinte énergétique et carbone des centres de calcul conduit à repenser la localisation des traitements et à réduire la quantité de données transférées depuis le capteur jusque dans le *cloud*. Dans ce contexte, le paradigme du «edge-computing» (calcul proche capteur) répond à cette problématique puisqu'il propose de placer des traitements de données au plus proche du capteur afin d'extraire des informations pertinentes qui seront alors envoyées vers les centres de calcul situés dans le cloud. Les challenges scientifiques de ce domaine concernent alors tous les niveaux de conception des capteurs et du calcul associé. Par exemple, les nouveaux paradigmes de calcul s'appuyant sur le calcul au plus proche des mémoires (logic-in-memory) demandent une intégration

plus intime d'éléments mémoire avec les composants de calcul. Au niveau des capteurs, leur alimentation est un enjeu important, et les techniques de récupération d'énergie sont essentielles pour assurer une durée de vie et / ou de fonctionnement suffisante. On notera dans ce contexte que les capteurs spintroniques ont connu un développement important.

C. Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle, et tout particulièrement l'apprentissage automatique/statistique, est au cœur des révolutions du numérique. La complexité calculatoire relative non seulement à la phase d'entraînement mais également à l'exploitation (inférence) implique l'utilisation de ressources matérielles de calcul spécialisées (accélérateurs). L'impact énergétique crucial et le développement durable, notamment dans les data-centers et les systèmes relevant du «Edge Computing» devront être pris en compte. Les avancées dans le domaine des nouvelles technologies combinées à l'émergence d'architectures de calculs neuromorphiques permettent aujourd'hui d'envisager l'exploitation de l'intelligence artificielle à divers niveaux et dans des enveloppes énergétiques largement réduites en comparaison des solutions actuelles.

D. Sécurité des systèmes matériels

La sécurité des systèmes-sur-puce complexes et hétérogènes qui équipent de plus en plus de systèmes électroniques connectés est un enjeu majeur aux nombreux verrous : efficacité des attaques physiques avec la réduction de dimensions des dispositifs et l'augmentation de la complexité, mise en évidence de nouveaux chemins d'attaques internes du matériel au logiciel et vice-versa, sécurité

vis-à-vis des moyens de tests et de correction d'erreurs... L'implantation matérielle efficace (consommation énergétique, sécurité, performance, surface) de nouveaux schémas de chiffrement, tels que le chiffement homomorphe et le chiffement post-quantique, est une problématique actuelle importante. Enfin dans le domaine des attaques par canaux cachés (analyse de consommation de puissance et / ou électromagnétique), des implémentations cryptographiques matérielles et logicielles, ou des techniques récentes d'apprentissages automatiques (*machine learning*, *deep learning*) ont donné de très bons résultats en termes d'efficacité même sur des implémentations sécurisées. Ces avancées ouvrent un nouveau champ de recherche sur l'exploitation de l'intelligence artificielle pour la sécurité des systèmes matériels, à mener en collaboration avec les sections 06 et 07.

E. Communication haut-débit

Les systèmes cyber-physiques requièrent le développement des éléments matériels permettant de relier à faible coût le système d'objets connectés (IoT), d'un côté au monde physique via des capteurs, et de l'autre côté au monde numérique via des communications sans fil. La prise en compte et la gestion de la consommation orientent la conception des circuits analogiques / RF / hétérogènes vers plus de modularité et d'agilité et une plus grande intégration. Les interfaces de communication utilisent donc des capteurs intelligents, des éléments de récupération d'énergie, la connaissance du réseau et de l'usage, la puissance du calcul numérique (adaptation, correction).

Les émetteurs-récepteurs 5G devront faire preuve d'une grande flexibilité en fréquence et en modes de fonctionnement afin de satisfaire aux spécifications du très haut débit tout en maintenant une faible consommation d'énergie. Les techniques de correction numérique seront de plus en plus utilisées pour corriger les imperfections dans les circuits analogiques/mixtes/RF et millimétriques.

Il faut noter que la spintronique a permis également le développement de fonctions radiofréquences (RF) de base prometteuses pour des composants hyperfréquences compacts, économiques et à faible coût pour répondre en particulier aux enjeux de l'IoT (Internet of Things).

F. Électronique organique

L'effort de recherche consenti au niveau national et mondial a permis durant ces 10 dernières années d'améliorer les propriétés des semi-conducteurs organiques jusqu'à un niveau proche de leurs homologues inorganiques. Une grande partie de la recherche en France est encore aujourd'hui focalisée sur des applications « traditionnelles » comme les cellules solaires (OPV), les photodiodes organiques (OPD), les diodes électroluminescentes (OLED) et l'éclairage pour lesquels les défis majeurs persistent. On citera par exemple le transfert entre l'efficacité de la conversion d'énergie très élevée à l'échelle du laboratoire vers une échelle d'une production industrielle par impression, le développement et la stabilité de nouveaux matériaux, l'amélioration des mobilités des semi-conducteurs, l'extension de la gamme spectrale au proche infrarouge...

En parallèle, la grande variété de ces semi-conducteurs et leurs propriétés (électrochimiques, mécaniques, morphologiques, opto-électroniques...) très spécifiques ouvrent de nouvelles perspectives en particulier pour la biologie et la médecine. Parmi les applications émergentes, on peut citer la spintronique organique, le laser organique et la bio-électronique, avec les bio-capteurs ou les Bio-MEMS où les défis résident dans l'intégration des matériaux organiques et leur bio compatibilité. Des cellules solaires organiques ultra-minces et extensibles ont été également réalisées. De nouveaux matériaux, de nouvelles architectures et technologies de traitement sont donc à développer pour répondre aux exigences uniques des appareils extensibles.

VI. Micro-nanotechnologies

La réalisation des micro-nanodispositifs fait appel à des étapes de micro-nanotechnologies, que ce soit pour des applications en électronique, en photonique, en optique ou en magnétisme, incluant les micro-nanosystèmes. Dans ce domaine, les laboratoires ont bénéficié de manière inestimable de l'organisation des grandes centrales technologiques sous la forme du réseau RENATECH, qui trouve aujourd'hui un prolongement et une ambition renouvelée dans le cadre de RENATECH+.

Les progrès des technologies de la nano, micro et optoélectronique permettent une diversification des fonctionnalités intégrées sur un même dispositif, laquelle nécessite le développement de matériaux fonctionnels intégrables sur une plateforme technologique de base, la plus développée et maîtrisée étant celle du silicium, suivie par le GaAs. Les matériaux et la maîtrise de leur mise en forme constituent donc un socle essentiel des activités de recherche. Ce domaine fait appel à des compétences pluridisciplinaires partant de la chimie des matériaux et des spécificités de leur élaboration, jusqu'à la réalisation de systèmes et dispositifs. Les développements impliquent une synergie croissante entre chercheurs issus de différents domaines de la chimie et science des matériaux, de la physique, de l'électronique, de la mécanique, de la micro et nano-fabrication, des systèmes et des méthodes de caractérisation avancées pour contrôler les étapes réalisées.

A. Matériaux

Les évolutions des besoins en fonctionnalités variées amènent à envisager l'utilisation de nouveaux matériaux (ou de matériaux sous de nouvelles formes) en fonction du domaine d'applications. Si l'élaboration d'hétéro-structures et nanostructures de semi-conducteurs III-V est toujours d'actualité – notamment

pour les domaines MIR et THz, on assiste à un accroissement de l'hétérogénéité des matériaux (association semi-conducteurs avec diélectriques, oxydes, nitrures...) pour améliorer et diversifier les fonctionnalités des dispositifs : isolants topologiques, matériaux à changement de phase pour l'agilité des dispositifs photoniques (accordabilité, modulation, non-linéarités...) ou pérovskites ferro-électriques pour le photovoltaïque, les sources visibles et la polaritonique.

Par ailleurs, les évolutions des architectures de dispositifs nécessitent le développement de nouvelles briques technologiques dans le domaine des semi-conducteurs, comme par exemple les matériaux à grand gap (type SiC, GaN) pour la réalisation de composants de puissance sur GaN et SiC. La synthèse de semi-conducteurs poreux, tels que Si et SiC, amène à des applications innovantes ; en particulier le Si poreux fournit un substrat électriquement isolant pour l'intégration de composants microélectroniques RF et de puissance, et les tranchées ou vias réalisés par gravure électrochimique du Si ouvrent vers les applications 3D (connectique ou capacités 3D).

Dans bon nombre de domaines, les matériaux en couches minces constituent les couches actives des dispositifs, de la microélectronique à l'optique/photonique ou l'énergie avec les cellules solaires et les dispositifs de stockage : carbones nano/microporeux et oxydes de métaux de transition ou de ferro-électriques pour les micro-super-condensateurs ; matériaux lamellaires ou matériaux à charpente poly-cationique pour les électrodes de micro-batteries Li-ion ; dispositifs à base de couches minces micro- et nanostructurées optiquement transparentes (discrétion visuelle), matériaux multi-ferroïques flexo-électriques (plastronique hyperfréquence, agilité)...

B. Matériaux fonctionnels, actifs

Parmi les matériaux fonctionnels, les oxydes occupent une place croissante pour

la réalisation de fonctionnalités spécifiques ou encore leur association au sein d'un système. Depuis deux décennies, leur introduction en tant que matériau épitaxié en premier lieu en microélectronique, a permis l'intégration de plusieurs fonctionnalités sur un même substrat. Ces développements se poursuivent et se diversifient : oxydes fonctionnels pour la thermoélectricité ou la plasmonique IR ; matériaux ferroélectriques (exemple HfZrO_2) pour la nanoélectronique ; matériaux piézoélectriques...

Dans l'élaboration des matériaux actifs (ou fonctionnels), des innovations importantes sont obtenues par association de matériaux magnéto-élastiques avec des matériaux piézoélectriques ou ferroélectriques pour la réalisation de dispositifs magnétoélectriques. On note également l'utilisation des matériaux fonctionnels de l'optique pour la réalisation de composants hyperfréquences. La miniaturisation des méta-matériaux, auxquels la structuration spécifique confère des propriétés inhabituelles, couplée au concept de « méta-matériaux actifs » ou « méta-surfaces », permet d'envisager de nouvelles potentialités en termes d'agilité des composants (programmation/reconfiguration), de localisation ou de couplage photon-phonon.

C. Techniques de nano-structuration

Les techniques de nano-structuration visent l'obtention de nanostructures (notamment à base d'oxydes métalliques comme les nanofils (NFs) de ZnO pour la récupération d'énergie) ou de nanoparticules (par exemple : utilisation comme outil pour le diagnostic et le theragnostic des nanoparticules (NPs) magnétiques actives en optique non-linéaire). Les NFs à base de semi-conducteur, bien maîtrisés au cours des dernières décennies, trouvent d'autres champs d'applications (exemple : les nanofils de III-V pour le *water-splitting*). Parmi les thèmes émergents, on peut citer

les nanostructures semi-conductrices à petit gap auxquelles sont associés des effets plasmoniques (incluant l'approche colloïdale) pour des applications en MIR/THz et la réalisation d'hétérostructures originales intégrant des couches magnétiques.

Bien au-delà de leur utilisation pour des études physiques théoriques, les « matériaux 2D » prennent de l'essor et sont développés pour des dispositifs. Après le graphène, le silicène ou le germanène, on assiste à la réalisation d'hétérostructures hBN/graphène. La recherche sur les matériaux 2D s'oriente vers les hétérostructures de dichalcogénures de métaux de transition pour des applications en microélectronique et optoélectronique. Dans le domaine de la spintronique, on constate l'émergence de matériaux multifonctionnels pour des dispositifs en rupture (applications mémoires, capteurs, radiofréquences, quantiques et neuromorphiques), ainsi que de nouveaux matériaux à propriétés originales (oxydes magnétiques ultra-minces, matériaux 2D magnétiques, couches moléculaires, isolants topologiques, systèmes hybrides ferromagnétiques/supraconducteurs, etc.). Les méta-matériaux spintroniques reconfigurables pour le traitement de signal permettent de générer, contrôler et traiter l'information dans un domaine fréquentiel commençant au GHz et pouvant s'étendre jusqu'au proche THz.

D. Énergie

Dans le domaine de l'énergie, la réflexion porte sur les solutions technologiques innovantes en matière de récupération de l'énergie (thermique, solaire, mécanique, RF...) et du stockage (comme évoqué en Micro et Nano-Systèmes : micro-batterie, micro-supercondensateur, dispositifs miniaturisés). En photovoltaïque, les technologies les plus soutenues sont le photovoltaïque en couches minces de silicium, les cellules Tandem III-V sur Si et les cellules solaires à contacts sélectifs. Les études sur le photovoltaïque portent aussi sur la structuration en films minces de maté-

riaux photosensibles constitués d'éléments abondants sur Terre (visant à pallier la pénurie annoncée des éléments rares et à prévenir les tensions géopolitiques d'approvisionnement), ainsi que sur l'utilisation de matériaux 2D pour l'ingénierie de bandes au sein de cellules tandem sur une base silicium.

En parallèle, le *photovoltaïque organique occupe une place toujours croissante au niveau national et international avec le développement de matériaux pour l'électronique organique et l'élaboration de nanoparticules. On note par ailleurs la place des modulateurs optiques à base de semi-conducteurs organiques ou la progression exponentielle des pérovskites ferroélectriques*. L'innovation durable impose la mise en œuvre de nouveaux matériaux (basse dimensionnalité, nano-structuration, anti-ferroélectrique...) et de dispositifs à faible coût, ayant un faible impact environnemental dans une démarche écoresponsable. Les enjeux futurs sont conditionnés par les nouvelles solutions pour la récupération, l'économie et la gestion intelligente de l'énergie.

E. Nouveaux paradigmes de traitement de l'information

Le développement actuel particulièrement rapide de l'intelligence artificielle, basée sur l'utilisation de réseaux de neurones, s'opère au prix d'une consommation énergétique gigantesque. La voie d'avenir va consister à passer des réseaux de neurones logiciels très énergivores actuels à des réseaux «matériels» de neurones et de synapses artificiels. L'émergence de nouveaux concepts et l'utilisation de nouvelles classes de matériaux pourraient apporter de réelles ruptures dans la prochaine décennie. On peut citer les démonstrations récentes utilisant des dispositifs spintroniques bio-inspirés comme neurones et / ou synapses artificiels. Également, on note l'engouement croissant, tant au niveau national qu'international, pour les matériaux isolants de Mott, à la fois pour des aspects fondamentaux mais

surtout plus récemment pour leur potentiel applicatif. L'étude de systèmes neuro-morphiques hardware génériques, non dépendant d'une application, pourrait constituer une future évolution.

F. Technologies de fabrication

Les technologies et les différentes étapes nécessaires au sein d'un procédé complet se sont complexifiées, en particulier avec la miniaturisation des systèmes qui impose une diminution constante des dimensions des zones actives ou d'intérêt. Les techniques de nano-fabrication de nano-objets et de nano structuration des surfaces au niveau 2D ou 3D sont directement inspirées de la nanoélectronique pour des applications en nano-optique et/ou nano-photonique. La maîtrise des paramètres structuraux (géométrie, taille, cristallinité...) des nano-objets, leur organisation sur des surfaces et le contrôle des interactions champ proche (exemple : réalisation de nano-gaps «ultimes» de taille sub-nanométrique) est un élément de plus en plus crucial dans la mise au point des procédés. Des technologies génériques (telles que les préparations/traitements de surface, les étapes de dépôt/croissance/reprise de croissance, la lithographie, les nouveaux procédés de structuration) sont développées comme les micro-technologies pour le décollement / report et le recyclage du substrat pour fabriquer des dispositifs optoélectroniques.

Que ce soit pour une approche «top-down» ou «bottom-up», de nouveaux concepts de nanostructuration sont en émergence :

– *Nanostructuration 3D*: lithographie à 2 photons associée au développement de résines multifonctionnelles pour une haute résolution spatiale et de nouvelles fonctionnalités optiques : assemblage 1D, 2D et 3D de NPs et réalisation de structures 3D ; transfert d'une structure 3D par gravure du substrat (Si) ou par infiltration du moule 3D par des matériaux transparents dans l'IR (TiO₂, ZnO)...

– *Nanofabrication sur substrats singuliers* de type membrane (épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres) et substrats souples. Les techniques de fabrication de nano-objets en solution par des techniques de synthèse chimique et de fonctionnalisation des surfaces (issues de la chimie) font appel à plusieurs procédés comme le développement de méthodes de synthèse chimique et de fonctionnalisation de boîtes quantiques (BQs) à base de semi-conducteurs (en visant un rendement maximal) et dépôt spatialement contrôlé de nano-cristaux, ou l'ingénierie de synthèse et de fonctionnalisation pour greffer avec une précision nanométrique des BQs isolés afin d'intégrer des nano-sources de photons uniques dans des dispositifs photoniques. Les technologies imprimées sur substrats ultra-flexibles sont particulièrement intéressantes en raison de leur adaptabilité et du grand nombre de degrés de liberté offerts.

– *Nano-structuration d'objets à l'aide d'ADN*, qui est une approche issue du couplage direct entre les domaines technologiques et la biologie moléculaire, avec la réalisation d'assemblages de type origami en solution et l'utilisation d'ADN comme agent d'aide à la mise en œuvre de nanostructures complexes. Ces approches permettent ainsi le contrôle des interactions moléculaires et constituent les prémices du développement d'approches nouvelles de bio-construction 3D (technologie additive).

De façon générale, il faut souligner l'importance des compétences en élaboration des matériaux et celle de leur pérennisation. Le contrôle, via l'épitaxie ou le procédé de dépôt, de la qualité cristalline des matériaux

devient de plus en plus crucial et son impact sur les performances des dispositifs est déterminant, en particulier à un niveau de miniaturisation ultime. Le contrôle et la maîtrise du dopage des nano-cristaux, leur auto-organisation et leur couplage avec des nano-objets et nanomatériaux, sont indispensables pour la réalisation de nanostructures plasmoniques et matériaux 2D (graphène, dichalcogénures de métaux de transition...). L'intégration monolithique hétérogène a amené le développement et la maîtrise de l'hétéro-épitaxie de semi-conducteur sur silicium puis sur GaAs, et a ouvert ensuite la voie à de nouveaux concepts pour la germination et la croissance, la nano-structuration des substrats, la croissance sélective et/ou latérale. Les derniers développements concernent l'organisation et l'épitaxie sur substrat fonctionnalisé.

La prise en compte de ces nouveaux développements n'est fructueuse que dans le cadre d'un couplage fort entre théorie, expérience et caractérisation, nécessitant la synergie entre chercheurs de différentes sections. Pour tous ces thèmes en consolidation ou en émergence, les études théoriques et les simulations numériques (dynamique moléculaire, calculs de structure électronique, approches multi-échelles, modélisations multi-physiques, simulation de transport quantique) occupent une place essentielle en complément des activités expérimentales. De nouvelles approches en caractérisation locale sont nécessaires pour atteindre une maîtrise ultime. En particulier, on voit l'émergence de la modélisation à l'échelle atomique des procédés de fabrication par des méthodes inspirées de l'Intelligence Artificielle.

SECTION 09

MÉCANIQUE DES SOLIDES. MATÉRIAUX ET STRUCTURES. BIOMÉCANIQUE. ACOUSTIQUE

Composition de la section

Brigitte BACROIX (présidente de section), Régis COTTEREAU (secrétaire scientifique), Fédérica DAGHIA, Stéphanie DEBOEUF, Julie DIANI, Amadou DIOP, Claudia FRITZ, Anthony GRAVOUIL, Sandra GUERARD, Françoise KRAZUCKI, Didier LASSAQUE, Arnaud LEJEUNE, Éric MAIRE, Olivier MILLET, Mariette NIVARD, Sylvain PATINET, Aurélien SAULOT, Vincent TOURNAT, Nicolas TRYANTAFYLLIDIS, Jérôme VASSEUR, Elsa VENNAT.

Résumé

Les thématiques de recherche majeures, traitées actuellement dans les laboratoires de la section 9, sont décrites ci-dessous ; ces thématiques sont pour la plupart très pluridisciplinaires et en lien direct avec les grands enjeux industriels ou sociétux actuels (énergie, transport, santé, écologie). Elles couvrent par ailleurs un large spectre des aspects les plus fondamentaux à de nombreuses applications.

Introduction

Depuis plus de 10 ans maintenant, les rapports de conjoncture successifs ré-affirment que les disciplines représentées dans la section 9 sont à la fois des disciplines de savoir et des disciplines de l'ingénierie. Nous ne dérogerons pas à la règle et commencerons par constater que c'est toujours le cas.

Mais, alors que le paysage de la recherche se complexifie énormément – et notamment les sources de financement possible – ce qui modifie en profondeur le métier de chercheur, trop souvent contraint désormais de passer d'une thématique à l'autre, sans logique scientifique ou sociétale évidente, il est illusoire de

prétendre dresser un panorama exhaustif des thématiques en développement ou en déclin. Nous avons donc simplement recensé, sur la base des rapports de conjoncture précédents et des rapports que nous avons pu faire depuis 3 ans sur les laboratoires, les chercheurs et les projets présentés aux concours, ce que sont, de notre point de vue, les grandes thématiques importantes qui occupent actuellement une place de plus en plus grande dans les laboratoires associés à la section 9.

Ces laboratoires comptent aujourd'hui 242 chercheurs en activité, auxquels il convient d'ajouter une douzaine de directeurs de recherche émérites, 270 personnels ITA CNRS environ et plus de 2 500 enseignants-chercheurs, chercheurs et ITA d'autres établissements. Ils sont principalement implantés dans des écoles d'ingénieur, dans lesquelles l'évolution récente des technologies a vu croître de façon importante le nombre d'EC dans les 20 dernières années (la section 60 du CNU a par exemple doublé en 20 ans, mais stagne désormais), contrairement au nombre de chercheurs CNRS qui, après avoir augmenté légèrement jusqu'en 2013 est plutôt stable depuis.

Malgré une stagnation des effectifs globaux d'enseignants-chercheurs et de chercheurs (associée à une baisse des effectifs IT dans les laboratoires), la communauté française de mécanique et d'acoustique possède toujours un fort rayonnement à l'international, comme en atteste notamment la représentation notable de nos laboratoires dans les principales revues du domaine de la mécanique et de l'acoustique dans lesquelles la France apparaît le plus souvent en 3^e position derrière les USA et la Chine, ou encore les médailles récentes décernées par les principales sociétés savantes internationales à plusieurs chercheurs français (par exemple, 4 enseignants – chercheurs ont été ainsi récompensés en 2018 par l'International Association of Computational Mechanics).

Si les thèmes développés vont de la recherche fondamentale aux applications, les thématiques traditionnelles (mécanique, biomécanique, acoustique) de la section 9 sont toujours en lien avec les grands enjeux sociétaux actuels principalement dans les domaines

de la santé (**diagnostics plus performants et réparation plus efficace**), de l'énergie et des transports (**matériaux et structures plus performants**) et de l'écologie (**matériaux, structures et procédés plus durables**).

Le « toujours plus » exigé dans ces trois domaines majeurs traduit le fait que les matériaux, les structures, et même les corps doivent pouvoir être soumis à des conditions d'utilisation de plus en plus sévères : c'est évidemment le cas pour les matériaux de structure que l'on veut pouvoir utiliser le plus longtemps possible dans des domaines de sollicitation plus larges (température, vitesse de déformation, déformation, contrainte) ou soumettre à des environnements plus hostiles (très hautes températures, chimie...), mais également pour les matériaux dits fonctionnels et même les matériaux du vivant (chocs, sport...).

Cela oblige ainsi à (i) développer des outils de diagnostic et de caractérisation de plus en plus performants, (ii) inventer de nouveaux matériaux multifonctionnels résistants mécaniquement et les procédés nécessaires à leur élaboration, (iii) réaliser des simulations multi-échelles, multi-physiques plus performantes en tenant compte de tous les phénomènes de couplage possible, (iv) sans jamais négliger la **durée de vie**. Sur chacun de ces 4 objectifs, la section 9 joue un rôle majeur, voire de leader sur certains aspects comme nous le verrons plus bas. Elle a de plus réussi à s'emparer de deux grandes révolutions technologiques actuelles que constituent le numérique (et la question du big data) et les nouveaux procédés d'élaboration (fabrication additive), comme en attestent quelques-uns des recrutements récents en section 9.

Pour répondre aux grands enjeux listés plus haut, les efforts ont porté sur des simulations plus performantes, rapides et prédictives (section 2), sur la poursuite du développement d'outils de caractérisation et d'observation *in situ* en 3 dimensions (section 3), l'étude de phénomènes couplés (sections 4, 6 et 7), et la prise en compte d'interactions de plus en plus importantes avec l'environnement et l'humain (sections 4, 5 et 8, conditions de vie, de trans-

port, de travail...), sans oublier le maintien d'une recherche solide portant sur les fondements de nos disciplines (section 1).

De ce fait, les recherches entreprises se doivent d'être de plus en plus multidisciplinaires et les mécaniciens et les acousticiens ont su s'associer à des biologistes, des physiciens, des chimistes, des automaticiens, des spécialistes de génie des procédés et même des médecins et des psychologues afin de s'atteler à des questions scientifiques de plus en plus complexes. Ces associations se traduisent d'ailleurs assez naturellement par le partage de certains mots-clés de notre section, puisque l'on retrouve par exemple les matériaux dans les sections 4, 5, 8, 10, 11, 12, 15, 18 et 28, la propagation d'ondes dans les sections 4 et 5, la biomécanique dans les sections 10 et 28, la mécanique en section 28 et la robotique en section 7. Cela s'est traduit également par la création de nombreux GDR pluridisciplinaires auxquels la section 9 est fortement associée (sur les 33 GDR concernant la section 9, 1/3 d'entre eux est rattaché principalement à une autre section, essentiellement parmi les sections 5, 8, 10, 15 et 28), ainsi que par l'accueil dans la section de chercheurs formés dans d'autres communautés (par exemple, presque 30 % des recrutements effectués depuis 2014 concernent ce type de profil), ce qui n'est pas sans risque sur le long terme (voir analyse SWOT en fin de rapport). Du point de vue scientifique, ces associations se sont traduites essentiellement par une part croissante des simulations aux petites échelles, de la prise en compte d'aspects multiphysiques, de recherches de plus en plus orientées vers le vivant, et d'une place grandissante à l'étude des matériaux architecturés au sens large (incluant les métamatériaux). Les grandes sociétés savantes françaises du domaine (mécanique, biomécanique, matériaux et acoustique) ont d'ailleurs également intégré ces aspects dans leurs groupes de travail (mécanique et incertain, matériaux numériques, fabrication additive...), tout en maintenant des aspects plus anciens mais toujours d'importance majeure pour l'industrie du futur (comme le soudage, ou le développement des matériaux composites). Au sein des

établissements d'enseignement supérieur associés aux laboratoires, cela se traduit par ailleurs par le développement (au caractère parfois anarchique) de formations pluridisciplinaires, censées être plus attractives pour les étudiants, et qui pour certaines ont balayé des formations plus spécialisées et parfois mieux adaptées aux besoins de l'industrie. Les grands industriels de l'énergie et du transport soulignent régulièrement par exemple le besoin de recruter plus de docteurs en mécanique des matériaux. En ce sens, la formation doctorale assurée par nos laboratoires ainsi que les écoles de formation soutenues par le CNRS constituent une bonne réponse.

I. Socle théorique commun

La Mécanique théorique des Solides ou plus généralement la Mécanique des Milieux Continus, a permis dans un passé récent une unification du langage et l'émergence d'un socle commun de connaissance. L'École Française, soutenue en particulier par le CNRS, a joué un grand rôle dans l'émergence et le développement des outils fondamentaux de modélisation. Tout cela a été possible grâce à un certain modèle de fonctionnement de la recherche, permettant aux chercheurs d'avoir du temps pour réfléchir, mûrir leurs connaissances, explorer de nouvelles pistes. Cette recherche fondamentale de haut niveau, ne donnant pas nécessairement des résultats immédiatement exploitables, doit être poursuivie et encouragée par nos instances. Pour cela, il est important d'en garder le caractère unitaire, d'investir dans le long terme et d'être vigilant à la formation initiale ou continue à travers notamment des actions de formation, comme les écoles d'été spécifiques (on peut citer les écoles de Mécanique Théorique de Quiberon qui ont lieu chaque année sur des thématiques différentes), ou encore des GDRs spécifiques. On ne peut que renouveler le souhait du rapport de conjoncture précédent de pouvoir bénéficier de financements récurrents, et de recrute-

ments réguliers, conditions nécessaires à ce que les savoirs et les compétences ne se perdent pas.

La Mécanique des Solides est une discipline vivante en constante évolution, ce qui entraîne un renouvellement de son cadre conceptuel en l'élargissant, afin de relever les défis qui lui sont posés par les applications de plus en plus nombreuses et variées. On peut citer pour les prochaines années, sans prétendre être exhaustif, plusieurs défis d'importance.

Il est de première importance de construire, en étant relié avec l'utilisation et/ou la fabrication de nouveaux matériaux et de nouvelles structures, une mécanique des Milieux Continus Généralisés, explorant des échelles plus fines, intégrant des gradients d'ordre supérieur, des énergies de surface ainsi que des couplages multiphysiques, et ceci autant pour des grandes transformations que des transformations fines.

En ce qui concerne le calcul de structures, il est nécessaire de sortir du cadre linéaire convexe. Cela impose de travailler dans un cadre mathématique difficile, où l'on devra progresser dans la prise en compte de la non-unicité, des instabilités, des localisations et pertes de régularité, ainsi que des problèmes de micro-structurations. Pour cela, il faudra construire de nouvelles lois de comportement, et bien sûr de nouveaux algorithmes numériques, associés à de nouvelles expériences à caractère fondamental.

Parmi les développements permettant entre autres la construction de modélisations pour les grandes transformations en mécanique des Milieux Continus Généralisés et la construction de schémas numériques plus performants sur des grands intervalles de temps et d'espace, ceux issus de la reformulation des lois et des grands principes de la mécanique avec des outils de géométrie différentielle modernes (variétés différentielles, Géométrie de Poisson...) sont fondamentaux.

Les disciplines « mécanique », « géométrie » et « mathématiques » ont des liens historiques très forts. Toutefois le développement des méthodes numériques a affaibli les liens qui existaient

entre la « mécanique » et la « géométrie ». Le renouvellement des liens et des collaborations entre ces deux communautés doivent impérativement se poursuivre et se renforcer, en cohérence avec les actions de l'INSIS pour renforcer les liens avec l'INSMI (c'est déjà le cas avec la création en 2019 du GDR GDM *Géométrie Différentielle et Mécanique*).

Pérenniser une culture à la fois théorique, numérique et expérimentale contribuera à répondre aux nouveaux défis industriels posés par la conception et la fabrication de nouveaux matériaux et de structures aux propriétés ciblées (contrôlabilité, performance, effet des imperfections, durée de vie, recyclabilité...) et à l'étude des métamatériaux (conversion d'ondes, résonateur d'Helmholtz...), faisant collaborer ainsi les mécaniciens et les acousticiens de la section 9.

II. Modélisation et Simulation Numérique

Du point de vue des enjeux en modélisation et simulation numérique, plusieurs aspects complémentaires et transversaux des différentes disciplines et thématiques de la section (acoustique, mécanique de la rupture, mécanique des matériaux et des structures, procédés) peuvent également être précisés.

Les outils numériques sont utilisés de plus en plus massivement pour le traitement des données. Les méthodes de réduction de modèle en particulier permettent des progrès notables sur la modélisation en temps réel pour l'aide à la décision (en lien avec le contrôle actif) ou la co-simulation. Ces aspects sont en plein essor et semblent pouvoir se développer encore, mais des questions apparaissent autour de la gestion des données elles-mêmes (stockage, archivage, standardisation et accès des données numériques mais également expérimentales). En revanche, la taille des bases de données utilisées par exemple en bioméca-

nique, en science des matériaux, en psycho-acoustique ne semble actuellement que marginalement permettre le développement de l'intelligence artificielle au sens entendu dans d'autres communautés (pour la reconnaissance d'images par exemple).

La communauté de la mécanique des solides est moins utilisatrice des ressources de calcul haute performance (HPC) que d'autres disciplines (en particulier la mécanique des fluides), ce qui est au moins en partie dû à des modèles physiques moins naturellement parallélisables à grande échelle (schéma implicite par exemple). En revanche, la communauté française est très bien reconnue pour le développement des méthodes numériques (cf. prix mentionnés plus haut). Les nouvelles architectures de calcul ouvrent de nouvelles possibilités, qui devront s'appuyer sur le développement d'algorithmes adaptés d'une part à ces architectures, mais également aux modèles physiques utilisés dans la communauté de la mécanique des solides. Ce point concerne les architectures GPU, déjà largement accessibles à la communauté mais encore peu utilisées, mais également les ordinateurs quantiques, dont le potentiel est plus lointain.

De nouvelles méthodes numériques continuent d'être développées pour des modèles de plus en plus complexes (couplage multi-physique, multi-échelles, coarse-graining, algorithmes de résolution basés sur la Transformée de Fourier Rapide, voir également la section 6). Le développement de ces modèles multi-échelles renforce ou crée de nouveaux ponts entre disciplines et communautés comme la mécanique des matériaux, la physique des petites échelles, ou la dynamique moléculaire. La résolution de problèmes couplant véritablement des échelles à la fois spatiales et temporelles sur plusieurs ordres de grandeur apparaît, malgré ces développements, toujours difficile. Des progrès semblent nécessaires, au moins autant en termes de modélisation qu'en termes purement numériques (modélisation probabiliste, ou basée plus fortement sur les données, par exemple), et pour ce faire, les chercheurs de la section 9 peuvent jouer un rôle majeur.

D'autre part, le domaine de la vérification et validation, consistant à proposer en plus des résultats de calcul des indicateurs de validité de ces résultats, font partie des axes forts de la communauté française de mécanique des solides numérique. L'enjeu pour les aspects de vérification (estimation d'erreur numérique) est principalement de percoler jusqu'aux outils industriels et d'être adaptés aux nouveaux algorithmes. Les aspects de validation (estimation d'erreur par rapport aux données) sont à réinventer en phase avec l'utilisation de plus en plus massive des données expérimentales, notamment due à l'imagerie (voir section 3). L'objectif majeur étant de réaliser des simulations précises, rapides et robustes, avec notamment une prise en compte de plus en plus physique des mécanismes élémentaires de plasticité, d'endommagement et de rupture aux échelles fines. L'enjeu de taille associé est en effet la sécurité des installations et engins de transport. Enfin, un regain d'intérêt pour les méthodes numériques d'optimisation de paramètres, de forme ou topologique (de l'échelle de la structure à la microstructure) est déjà observé avec la mise à disposition large d'appareils de fabrication additive pour la communauté de mécanique des solides, qui permettent de réaliser effectivement des structures beaucoup moins contraintes que par le passé.

III. Mécanique expérimentale

Les sciences expérimentales, qui jouent un rôle majeur à l'INSIS, sont une des clefs de voûte de la section 9. La mécanique expérimentale ne fait pas exception et les laboratoires de la section ont été très actifs, novateurs et donc très visibles dans ce secteur sur la récente période. Si la caractérisation expérimentale (les essais mécaniques standards notamment) a connu peu d'avancées notoires et continue avec efficacité à se développer de manière incrémentale dans les laboratoires, c'est l'instrumentation de ces essais qui a énormément

progressé. On résume très souvent ces progrès par le terme « imagerie ». De manière plus précise, nous pouvons noter que la période récente a vu une progression spectaculaire de l'utilisation quantitative de l'imagerie en mécanique des matériaux et des structures.

Les essais dans les laboratoires sont aujourd'hui quasiment systématiquement instrumentés avec des méthodes optiques (voire plus, avec parfois l'ajout de caméras thermiques) mais aussi, ils sont aujourd'hui couplés lors d'essais dits « in situ » à des observations par microscopie électronique, neutronique, en champ proche, rayons X voire ultrasons. Dans toutes ces méthodes, les améliorations récentes ont porté sur la résolution spatiale et la résolution temporelle, qui sont deux clefs de la réussite de ces essais. Ainsi en imagerie optique, l'avènement de caméras ultra résolues et rapides permet des avancées dans la caractérisation mécanique associée y compris dans le domaine dynamique. Une autre tendance est que cette imagerie devient de plus en plus en 3D. Depuis longtemps, les laboratoires de la section ont été pionniers dans l'utilisation couplée de la tomographie aux rayons X sous sollicitation mécanique (en géoscience puis en science des matériaux) mais les cinq dernières années ont vu une explosion du nombre d'appareils permettant ces observations dans les laboratoires. Cette imagerie 3D peut aujourd'hui être réalisée rapidement malgré le nombre important de radiographies à acquérir (20 à 200 scans de tomographie par seconde) et des chercheurs de la section sont même récemment parvenus à reconstruire un volume 3D avec une seule radio ce qui nous amène à des acquisitions ultra rapides, à l'échelle temporelle de la radiographie.

Tous ces progrès qualitatifs s'accompagnent systématiquement aujourd'hui d'une utilisation quantitative de ces images, avec l'analyse d'images 3D d'abord. Les mesures tirées de cette analyse alimentent les modèles analytiques développés dans la section et sont des données irréfutables pour comparer avec les prévisions et ainsi valider les modèles. Les mesures de champs et le calcul direct à partir des images (2D mais surtout 3D) sont aussi systématique-

ment utilisés, et sur ces deux techniques les laboratoires de mécanique de la section 9 ont une contribution internationalement reconnue. Cette utilisation quantitative systématique d'images 3D a permis de revisiter un grand nombre de problèmes classiques de la mécanique et de les aborder avec un œil nouveau (rupture dynamique, déformation des matériaux cellulaires ou des biomatériaux, endommagement fragile et ductile, solidification et comportement mécanique des nouveaux matériaux issus de la fabrication additive...), améliorant ainsi dans de nombreux cas, le caractère prédictif des modèles en question.

Associé à ces développements, apparaît également un aspect numérique important : le volume de données obtenues dans les laboratoires explose et des stratégies sont à mettre en œuvre face à cette explosion, qui est actuellement gérée grâce au positionnement intéressant de la section dans l'institut, en contact direct avec des spécialistes des problèmes numériques. Quelques propositions intéressantes d'utilisation de techniques d'intelligence artificielle pour faire face à nos « big data » commencent à émerger dans la communauté et sont à explorer rapidement.

IV. Ondes acoustiques et vibrations

L'étude des phénomènes ayant trait aux vibrations de la matière et à leur propagation sous forme d'ondes (acoustiques et élastiques), constituent une thématique de recherche importante de la section 9. Elle implique en France environ 70 chercheurs CNRS et près de 300 enseignants-chercheurs répartis dans une dizaine de laboratoires. Cependant, il est clair que l'acoustique est aussi utilisée beaucoup plus largement comme moyen de caractérisation, ou d'imagerie complémentaire à d'autres méthodes par de nombreux collègues et laboratoires (émission acoustique en méca-

rique et science des matériaux, imagerie acoustique, microscopie acoustique, sollicitation dynamique...). Les phénomènes acoustiques et leurs applications couvrent un très large spectre de sujets de recherche allant d'aspects fondamentaux de contrôle d'ondes par des métamatériaux aux dispositifs d'imagerie et de thérapie médicales en passant par l'électro-acoustique, la vibro-acoustique, l'aéro-acoustique, la bio-acoustique, l'acoustique sous-marine, jusqu'à la perception auditive, la production sonore ainsi que l'acoustique des instruments de musique, par exemple. Ce très large champ d'investigation implique que cette thématique soit transverse, ce qui induit de nombreux recoupements avec les activités d'autres sections du Comité National (5, 7, 8, 10, 18, 30...). Parmi ce champ thématique large, le contrôle des ondes mécaniques par les métamatériaux ou milieux architecturés ainsi que les problématiques d'imagerie et de caractérisation par ultrasons sont plus particulièrement développés ci-dessous, compte tenu de la place prise actuellement par ces sujets.

A. Métamatériaux et milieux structurés pour le contrôle des ondes

Le contrôle de la propagation des ondes acoustiques et élastiques par des matériaux artificiels anime une grande partie de la communauté scientifique française et internationale en acoustique (Chine, Europe, USA, notamment). Ces structures composites artificielles peuvent en effet présenter de nombreuses propriétés originales (bandes interdites fréquentielles, modes à dispersion négative, modes localisés, guidés, unidirectionnels...) inexistantes dans la plupart des milieux naturels. Si les travaux menés jusqu'à récemment se limitaient à des études assez fondamentales donnant lieu à très peu de réalisations concrètes et industrialisables, ces dernières années ont vu la création de plusieurs start-ups (dont Metacoustic au Mans et Metabsorber à Besan-

çon...) ayant pour objectif de proposer aux industriels des solutions efficaces à leurs problématiques, en particulier dans le domaine de l'isolation acoustique, basées sur les métamatériaux. Ces nouveaux isolants soniques, intéressant aussi de grands groupes comme la SNCF, Safran..., ont la particularité de présenter des épaisseurs très inférieures à la longueur d'onde et donc un encombrement et une masse bien plus faibles que les solutions proposées actuellement. Cependant la réalisation d'isolants soniques très basses fréquences (environ 100 Hz), larges bandes et peu encombrants restent encore un défi à fort impact sociétal. L'effort devra aussi porter sur le design de structures constituées de matériaux à faible impact environnemental. C'est ainsi que le GDR META a été créé en 2017 afin de fédérer la communauté française des métamatériaux acoustiques et de favoriser les interactions entre le monde industriel et le monde académique. La réalisation à plus grande échelle de ces structures (matériaux, coût...) devrait aussi bénéficier des développements récents des techniques d'impression 3D et de fabrication additive et donc d'une collaboration plus étroite entre mécaniciens et acousticiens (voir section 6).

La richesse des phénomènes étudiés dans ce contexte est aussi largement inspirée par d'autres communautés (optique, électromagnétisme, physique non linéaire, physique du solide, géophysique...) avec qui la communauté de l'acoustique échange régulièrement : isolants topologiques (en lien avec le prix Nobel 2016), propagation en systèmes non-Hermitiens avec gains et pertes localisés, non-réciprocité dans les systèmes non linéaires, biaisés ou modulés en temps (exemple de la « diode » acoustique), ondes lentes, indices de propagation nuls, lentilles acoustiques à réfraction négative ou à base de métamatériaux, barrières sismiques à base de résonateurs... Les développements conceptuels récents incluent par exemple des recherches sur la brisure de la réciprocité de milieux de propagation (effet de diode acoustique), la mise en œuvre et la modélisation de métasurfaces (homogénéisation dynamique), l'étude et la mise en évidence des modes de bord topologiques...

B. Ultrasons pour l'imagerie médicale, la thérapie et la caractérisation des matériaux

La thématique de l'acoustique médicale a connu de nombreux développements technologiques ces dernières années ce qui permet in fine de proposer aux médecins des moyens de prévention, de diagnostic et de thérapie de plus en plus performants (élastographie impulsionnelle, échographie ultra-rapide, thérapie par faisceaux ultrasonores focalisés de forte intensité, tomographie ultrasonore...). Les équipes françaises contribuent de manière essentielle à ces avancées notamment liées aux nouveautés matérielles et logicielles, mais aussi, dans une moindre mesure, aux développements des concepts de propagation des ultrasons dans les milieux complexes (thématique bien ancrée dans la section 9). Il s'ensuit une forte activité de valorisation comme en témoigne la création de plusieurs start-ups durant les dernières années, donnant ainsi accès à des dispositifs directement utilisables dans le monde médical. Il s'agit aussi d'une thématique qui s'inscrit dans une forte coopération avec certaines équipes de l'INSERM et le milieu hospitalier. Les techniques d'imagerie ultrasonores ont montré leur complémentarité avec d'autres techniques d'imagerie (RX, IRM...) et des travaux importants, et à poursuivre, sont menés pour proposer des dispositifs combinant plusieurs de ces méthodes. Cette thématique se retrouve aussi dans les sections 28 et 54, les activités concernant la section 9 étant plus orientées vers la modélisation du rayonnement et de la propagation ultrasonore ou de l'interaction onde-matière. Elles rejoignent sur certains aspects de développement méthodologiques, les recherches sur la caractérisation des matériaux, ou le contrôle non destructif par ultrasons (méthodes non linéaires en particulier). On peut mentionner par exemple les ultrasons laser, ensemble de techniques en développement permettant de générer et détecter sans contact des ultrasons de quelques kHz aux hyperfréquences (GHz) et ainsi de réaliser des tests acoustiques aux

échelles micro- voire nanométriques, pour la caractérisation et l'imagerie de cellules biologiques ou de microstructures par exemple. Ainsi on constate que les échelles en jeu en acoustique vont du nanomètre au kilomètre typiquement.

D'autres thématiques prometteuses ou bénéficiant d'une bonne visibilité, mais qui mériteraient de se structurer dans les années qui viennent, portent sur la pression de radiation acoustique (pince acoustique par exemple), les ondes de chocs, l'acousto-fluidique, l'acoustique des mousses et des systèmes bulleux, le contrôle des champs audio 3D et la virtualisation...

V. Biomécanique et Mécanobiologie

La biomécanique se définit comme l'application de la mécanique à des « entités » biologiques. Nous avons assisté ces dernières années à un essor important des thématiques portant sur la « Mécanique du vivant », en particulier en raison des enjeux sociétaux liés à la santé et au vieillissement de la population. La communauté de la section 9 a été partie prenante de cette évolution et de nombreuses équipes travaillent dans ce domaine interdisciplinaire, souvent à la frontière d'autres sections, en particulier les sections 10, 28, 5 et 11, 20 à 26. Les interactions sont également très fortes avec les CID 51 et 54. Enfin, l'implication des praticiens et les liens avec le milieu clinique, indispensables à la réalisation de ces travaux, se sont également largement développés.

Depuis l'étude classique en section 9 du comportement mécanique des matériaux et des structures portant principalement sur des matériaux durs (squelette, os, prothèses...), les travaux menés dans les laboratoires de la section 9 se sont très largement diversifiés. Ils se sont orientés vers l'étude de matériaux mous

(peau, organes, tissus biologiques...), ou ont concerné des conditions de plus en plus sévères (chocs, sport par exemple). En parallèle, les liens avec la robotique et l'acoustique se sont également développés dans les domaines de la conception d'endoprothèses par exemple ou du développement d'outils de diagnostic (voir section 4). Dans le domaine de la santé, comme dans celui des transports ou de l'énergie, on assiste également au développement de nouveaux matériaux multifonctionnels, biomimétiques, pour lesquels l'étude du comportement mécanique reste indispensable, ce qui donne lieu là également à des développements de méthodes de caractérisation dédiées, et au développement d'études à des échelles de plus en plus fines.

Tous ces travaux peuvent en effet être développés *in vivo* ou *in-vitro* et se situer à différentes échelles : l'échelle du sujet entier (souvent l'être humain) ou d'une partie du corps ; l'échelle des organes ; l'échelle des tissus ; l'échelle des cellules et enfin l'échelle sub-cellulaire. Les applications sont nombreuses et variées : biomécanique ostéo-articulaire, dentaire, cardio-vasculaire, respiratoire, accidentologie, robotique humanoïde, ergonomie, biomécanique des plantes et du bois... et sont nécessairement traitées par des équipes pluridisciplinaires.

À l'échelle du sujet, sont menés de nombreux travaux concernant la cinématique et la dynamique de l'ensemble articulé qu'est l'être humain en les couplant à des aspects de fonctionnement musculaire et de contrôle moteur. Dans le domaine sportif, ces études permettent de mieux comprendre le comportement du sportif afin d'améliorer les techniques et les équipements. Dans le domaine de l'orthopédie et des troubles neuromoteurs, ils contribuent à une meilleure corrélation entre pathologie et comportement mécanique, et donc à une meilleure conception des prothèses et une meilleure prise en charge thérapeutique des patients *in fine*. L'une des difficultés majeures de ces études demeure encore dans la réalisation (délicate) de mesures *in-vivo* fiables permettant d'alimenter des modèles réalistes ; le dialogue entre mesures et modèles reste

encore ici trop limité, et doit donc être encouragé.

À l'échelle de l'organe, des organes artificiels voient le jour : pour mieux comprendre le fonctionnement de ceux-ci, pour que le chirurgien puisse s'entraîner avant une opération sur l'organe du patient reproduit le plus fidèlement possible (grâce par exemple aux progrès de la fabrication additive) ou aussi pour envisager le remplacement de l'organe. Dans ce domaine, plusieurs équipes de la section 9 sont particulièrement actives, notamment dans le développement de mannequins d'apprentissage du soin ou de modélisation utiles aux chirurgiens, afin d'améliorer l'efficacité des soins et traitements.

À l'échelle des tissus, c'est l'arrivée des nouvelles techniques d'imagerie 3D qui aujourd'hui bouleverse les connaissances. Le rôle des biomécaniciens est notamment, comme déjà mentionné dans la section 2, de veiller à la quantification découlant des images obtenues qui servira à des modélisations et des prévisions (cruciales en médecine). Une des difficultés liées à l'étude des tissus biologiques est leur état hydraté, perfusé et en évolution avec différentes échelles de temps.

La bioingénierie tissulaire et le développement de biomatériaux de substitution constitue un domaine prometteur, comme en atteste la publication de plusieurs brevets récents. Si les mécaniciens ne sont pas nécessairement leaders dans ce domaine, ils ont cependant toute leur place pour en étudier et modéliser le comportement mécanique en interaction avec le vivant. Il existe en effet un lien fort entre biologie et mécanique. Nos cellules sont capables de ressentir des contraintes mécaniques et, en fonction de leur niveau, de déclencher des processus biologiques complexes comme par exemple le remodelage osseux (c'est la mécano-transduction). Si c'est au niveau macroscopique que ces phénomènes ont été découverts, c'est maintenant **au niveau de la cellule** qu'ils ont besoin d'être compris. Quel environnement mécanique est favorable à telle ou telle application (notamment en ingénierie tissulaire)? Les mécaniciens ont leur rôle à jouer dans l'explo-

ration de ces phénomènes, notamment par une description et une modélisation fine des états de contraintes et de leur dynamique. Les avancées se feront par un dialogue avec les biologistes, la mise en place d'un vocabulaire commun et l'intégration effective de phénomènes biologiques dans les modèles. L'importance de la prise en compte des aspects « fluides », des interactions fluide-structure est à souligner et les approches multi-physiques pourront également y contribuer. Un tel constat a d'ailleurs déjà donné lieu à la création de plusieurs GDR très pluridisciplinaires, comme le GDR « Réparer l'humain », centré sur le thème de la médecine réparatrice, mais également le GDR MecaBio, qui se concentre plus particulièrement sur les problèmes fondamentaux de (i) modélisation et caractérisation de fluides biologiques en interaction et de (ii) modélisation et caractérisation de matériaux du et pour le vivant ainsi que de leur évolution dynamique. Il est important de souligner que les chercheurs biomécaniciens de la section 9 sont particulièrement actifs dans l'organisation d'écoles d'été dans le cadre de ce GDR.

VI. Matériaux et structures optimisés

Comme déjà évoqué plus haut, nous assistons actuellement au développement de procédés innovants tels que la fabrication additive, la lithographie de métaux à l'échelle nanométrique, la mise en œuvre de nano-multicouches polymères, la stéréolithographie de céramiques... Ces procédés permettent d'architecturer les matériaux en trois dimensions et ainsi d'obtenir des propriétés mécaniques ou multi-physiques optimisées ou nouvelles.

La recherche de propriétés mécaniques améliorées conduit également à un regain d'intérêt pour d'autres matériaux comme par exemple les verres métalliques à limite d'élasticité élevée ou les alliages à haute entropie et

acier twip présentant une grande ductilité, et tous matériaux présentant une bonne tenue en conditions extrêmes de température ou de chocs par exemple.

Tous ces matériaux nécessitent des études expérimentales de caractérisation microstructurale in-situ. L'objectif est une analyse toujours plus fine des microstructures et de leurs évolutions sous chargement, afin de nourrir une modélisation descriptive mais aussi prédictive du comportement mécanique des matériaux. Dans ce sens, la modélisation multi-échelle basée sur la résolution des équations de Lippmann-Swinger par transformation de Fourier rapide d'une microstructure hétérogène décrite par un milieu périodique, introduite dans un laboratoire du CNRS il y a une vingtaine d'années, devrait continuer à se développer grâce à deux atouts : la simplicité de mise en œuvre et l'application directe aux microstructures voxelisées enregistrées par les techniques d'imagerie in-situ.

Par ailleurs, le développement des outils de modélisation aux échelles fines (cf. section 2) comme les calculs atomistiques, la dynamique de dislocations, les méthodes de type champs de phases... donnent accès à une meilleure compréhension des relations entre la microstructure et les propriétés mécaniques. Cependant, la définition de liens quantitatifs entre les échelles constitue encore une difficulté majeure pour atteindre une modélisation multi-échelle.

Les couplages mécanique / multi-physiques ou chimiques restent encore largement à explorer aussi bien d'un point de vue expérimental que d'un point de vue modélisation. Ce champ ouvre l'étude de problèmes en sciences des matériaux, physique, électronique... avec des applications récentes dans le domaine des matériaux intelligents, plus verts, autoréparants, films photovoltaïques... où le couplage entre les propriétés électromagnétiques, électroniques et thermo-mécaniques est la raison de leur intérêt. La résolution des problèmes mécaniques, électroniques, électromagnétiques, chimiques, etc. de façon indépendante et sans tenir compte des couplages n'est plus suffisante dans de nombreux cas comme celui

de l'optimisation des moteurs électriques ou du développement de microsystèmes électromécaniques de tailles toujours plus petites.

Un autre champ d'intérêt se développant rapidement concerne les métamatériaux, et plus précisément ici, l'étude de leur comportement mécanique, parfois de manière indépendante de celle de l'optimisation de leurs propriétés fonctionnelles (voir section 4). Les premiers travaux ont consisté à l'optimisation topologique de structures périodiques dans le cadre de l'élasticité linéaire. Un large arsenal d'outils mathématiques a été développé dans ce cadre, le plus récent utilisant des méthodes de type level-set. Cependant, il a été observé que ces microstructures pouvaient présenter des parties élancées favorables au flambement, ou des non-linéarités géométriques induisant des changements de motifs même aux petites déformations. Afin de prévoir les possibles changements de configuration lors d'un chargement macroscopique, de nouveaux outils ont émergé basés sur la théorie des groupes qui permet de restreindre l'ensemble des solutions aux sous-espaces appropriés.

Enfin, comme il vient d'être mentionné, l'optimisation topologique de matériaux ou structure s'est largement développée avec succès dans le cadre théorique de l'élasticité linéaire. L'intérêt maintenant se tourne vers la viscoélasticité linéaire pour des applications d'amortissement ou de chargement dynamique, et l'élasticité non-linéaire pour les applications aux matériaux élastomères par exemple.

VII. Surfaces et interfaces

Les surfaces et les interfaces représentent les conditions limites des solides, tant avec leur milieu environnant qu'entre eux. Elles sont le lieu central de transmission des actions mécaniques à l'origine de la fiabilité de nombreux systèmes complexes incluant l'être humain. Comprendre leur évolution et, *in*

fine, maîtriser leur comportement spatial et temporel continue de représenter un challenge majeur dont l'enjeu sociétal est indéniable (minimisation de la déperdition énergétique par frottement, amélioration de la durée de vie des mécanismes, diminution de la production de particules (ultra-)fines tribogénérées, amélioration de la bio-tribo-compatibilité des surfaces de prothèses...).

Surfaces et interfaces sont le lieu de phénomènes multi-physiques et multi-échelles qui nécessitent une approche interdisciplinaire forte au carrefour, tout particulièrement, de la mécanique, de la physique, de la chimie, de l'optique, de la biologie ainsi que de la science des matériaux. Les laboratoires de la section 9 jouent un rôle véritablement central dans le développement de cette transdisciplinarité avec, par exemple, la création et/ou le renouvellement de plusieurs structures telles que des Labex (ex : IMust, Manutech-SISE...), des écoles universitaires de recherche (SLEIGHT...), des GDR (TACT, SurfTOPO, APPAMAT...), des laboratoires internationaux associés (Elyt-Lab...), etc... qui croisent les compétences de plusieurs communautés scientifiques autour des thématiques de surface et/ou d'interface. D'autres thématiques scientifiques (et GDR associés) relevant plus généralement de la science des matériaux, comme par exemple celles traitant de microstructures en évolution (recristallisation, transformations de phases...) sont également en partie traitées par les mécaniciens, notamment dans le domaine de la modélisation (avec le développement d'approches de type level-set et la confrontation de modélisations développées à différentes échelles) et de la prévision des évolutions microstructurales, reposant en grande partie sur la mobilité des interfaces (en l'occurrence les joints de grains) sous sollicitations thermiques, chimiques et mécaniques.

Cette thématique des surfaces et interfaces bénéficie ainsi d'avancées importantes tant dans les moyens de caractérisation mécanique, physique, chimique, électrique et acoustique que dans les moyens de simulations numériques continus et/ou discrets. Par exemple, il est actuellement possible de réaliser des essais

de micro ou nano-caractérisation de couches minces en surface d'un solide, celles-ci étant issues d'un revêtement déposé ou résultant d'une sollicitation tribologique (couche de 3^e corps ou tribofilm). Grâce aux techniques récentes de micro-usinage FIB ou de laser Femto, ces couches peuvent ainsi être formées (micro-pilier, poutre...) puis testées *via*, entre autres, la nano-indentation ou la microscopie de force atomique afin de remonter à leurs propriétés mécaniques, électriques ou encore physico-chimiques. Ces données acquises expérimentalement sont de plus en plus quantitatives et servent désormais d'entrées à des modèles multi-physiques (mécanique, thermique, chimique, électrique...) et multi-échelles (modèles FEM-DEM, FEM-MD...) de plus en plus prédictifs. Les temps de calculs de ces derniers sont de plus en plus optimisés grâce au travail remarquable des numériciens.

À l'échelle des surfaces, la communauté continue de relever de nombreux défis tels que celui de la normalisation multi-échelle des caractéristiques des reliefs d'un matériau solide (GDR SurfTOPO) ou encore celui de la maîtrise du comportement tribologique, mécanique et physico-chimique des surfaces texturées par laser ultracourt (type femto-seconde, EquipeX Manutech-USD) en vue d'en améliorer, par exemple, leur bio-tribo-compatibilité.

Accéder aux propriétés *in vivo*, c'est-à-dire *in situ* et dynamiquement, d'une interface fluide ou solide sans la perturber constitue un véritable Graal pour les mécaniciens des interfaces. Récemment, grâce au travail conjoint de laboratoires d'optique et de mécanique, des techniques de mesures opto-mécaniques pour les interfaces fluides et solides ont été développées avec succès. Ces techniques permettent par exemple de mesurer la pression hydrostatique et la température locale d'une interface lubrifiée en introduisant et en suivant la réponse de nano-sondes mécano-thermo-sensibles dans un fluide interfacial. En sus de ces mesures de propriétés locales de l'interface, des travaux ont été menés afin d'améliorer, et parfois de redéfinir, les lois rhéologiques des lubrifiants fluides, solides ou mixtes

fluides/solides dans des conditions extrêmes de pression, cisaillement et température en prenant en compte l'impact de leur pollution.

Surfaces et interfaces sont intimement liées et nécessitent des approches désormais conjointes. Actuellement, des approches de type mécanique de la rupture sont développées, et validées expérimentalement, afin d'appréhender les phénomènes à l'origine de l'ouverture d'un contact entre deux solides.

Plus globalement encore, le lien entre les surfaces et les interfaces peut être décrit au travers d'un bilan énergétique complet qui permet d'appréhender les mécanismes de transfert d'énergie réciproque entre l'interface et la surface mais aussi en leur sein. *In fine*, cette approche globale permettra d'évaluer les conséquences de ces transferts d'énergie sur l'évolution physico – chimique et micro-structurale des matériaux mis en jeux et donc de leur durée de vie.

VIII. L'homme et son environnement

Comme expliqué à plusieurs reprises, les travaux de recherche menés dans les laboratoires de la section 9 ont pour objectif de faire avancer le front de la connaissance dans les disciplines de base des sciences de l'ingénierie et de les mettre en synergie pour s'attaquer aux grands enjeux de société. Dans un monde régenté par une course folle aux innovations numériques et technologiques, il apparaît primordial de ne pas oublier l'humain. En conséquence, l'étude de l'homme en interaction avec son environnement s'avère fondamentale. Les travaux qui en découlent doivent par nature être très interdisciplinaires, et cette interdisciplinarité, bien que vivement souhaitée par le CNRS sur le papier, pose en pratique des problèmes au niveau du recrutement – car le très faible nombre de postes incite à recruter des chercheurs dont le projet est plus ancré « au

cœur» de la section – ainsi que de l'évaluation et la progression de carrière de ces chercheurs.

L'interaction de l'homme avec son environnement peut se faire à différents niveaux et dans différentes modalités de sorte que les études qui s'y rapportent couvrent un spectre de thématiques très larges, et sont de caractère fondamental aussi bien que très appliqué. Sans prétendre être exhaustif, et sans vouloir être réducteur, nous pouvons catégoriser les différentes recherches menées sur ce thème suivant trois axes actuellement très actifs (les disciplines associées relevant de la section 9 sont notées entre parenthèses) :

– Comment l'homme perçoit et réagit à son environnement sonore et tactile : audition, paysages sonores, perception de la parole, perception de la musique, perception tactile et vibro-tactile... [psycho-acoustique, acoustique musicale, science des matériaux, robotique...]

– Comment l'homme interagit avec des machines : exosquelettes, robots, instruments de musique, retour haptique, troubles musculo-squelettiques... [robotique, bio-mécanique, acoustique musicale...]

– Comment l'homme vit dans son environnement : les mouvements humains, et tout ce qui est relatif aux matériaux du vivant (de la réparation à l'imagerie en passant par leur endommagement)... [bio-mécanique, acoustique, robotique...].

Tous ces axes de développement font appel aux disciplines majeures développées plus haut, et à la robotique, également présente dans quelques laboratoires relevant de la section 9 (représentant 20% environ des unités actives au sein du GDR Robotique). Également très transverse et multi-sections, la robotique est sollicitée aujourd'hui pour la conception de robots légers, rapides, fortement intégrés ou reconfigurables, robustes et fiables. Parmi les thématiques d'excellence de la France au niveau mondial, nous pouvons citer, sans exhaustivité, la robotique humanoïde, la commande des robots, la conception et l'analyse de robots complexes (robots à câbles ou en tenségrité, robots continus de faibles dimensions pour les applications médicales), la robo-

tique d'interaction, la microrobotique, la planification du mouvement, etc. De nouveaux défis émergent également, comme notamment la robotique complaisante et le biomimétisme, qui peut contribuer significativement à une plus grande acceptabilité des robots dans notre quotidien, ou encore une conception plus durable (en termes d'efficacité énergétique mais également de frugalité en ressources et de recyclabilité). Pour relever ces défis, la section 9 peut jouer un rôle majeur dans des recherches concernant la conception mécanique, la dynamique des systèmes ou encore le développement de composants technologiques innovants et la mise en œuvre de nouveaux matériaux plus légers, plus souples, plus actifs notamment. Cependant, du fait que la robotique soit également devenue un axe de développement important pour de nombreux domaines industriels (production logistique, technologies pour la santé et les services à la personne, l'exploitation des ressources naturelles...), on note que les jeunes chercheurs intéressés sont plus naturellement attirés vers le monde industriel que par celui de la recherche, et l'on a pu constater en quelques années un déficit de projets en la matière.

Conclusion

Dans les sections précédentes, le caractère pluridisciplinaire des recherches en cours a été maintes fois souligné. En travaillant sur les grands enjeux sociétaux listés dans l'introduction, les thématiques dites « cœur de section » que sont la mécanique (appliquée principalement aux structures et matériaux associés) et l'acoustique (étude de la propagation des ondes) se sont en effet développées assez largement dans les 5 dernières années aux interfaces avec d'autres sections (principalement la 5 et la 28).

En ce qui concerne les recrutements réalisés depuis le dernier rapport de conjoncture, toutes les sections listées plus haut ont pu

bénéficier d'au moins un nouveau recrutement, même si la plus grande partie de ces recrutements a concerné soit la modélisation et la simulation numérique (7/27) soit la thématique ondes et acoustiques (6/27). L'ouverture vers d'autres sections a pu être réalisée soit en attirant dans les laboratoires de la section des chercheurs formés dans d'autres communautés (essentiellement des physiciens), soit également en permettant à des chercheurs formés dans les laboratoires de la section de développer des thématiques très pluridisciplinaires (parfois hors INSIS). De ce fait, les chercheurs en section 9 sont aujourd'hui assez dispersés géographiquement et thématiquement. En effet, même si la section contient quelques laboratoires (4 ou 5) comptant plus de 10 chercheurs de la section 9 dans leurs effectifs, ces laboratoires sont tous très pluridisciplinaires et couvrent presque de fait l'ensemble des thématiques de la section.

Cette dispersion géographique et thématique, associée de fait à une absence de culture de base partagée n'est pas sans risque pour le maintien de compétences fortes dans les disciplines « cœur de section », et le maintien du rayonnement de la communauté. Les projets aux interfaces peuvent à l'inverse être plus attractifs pour de jeunes chercheurs et permettre ainsi d'attirer toujours plus de talents. Ces projets peuvent permettre également de renouveler en partie les partenaires industriels traditionnels de la section 9. En effet, si les enjeux liés aux domaines de l'énergie et des transports se traitent le plus souvent en lien avec les grands groupes industriels, les

enjeux liés à la santé et l'écologie se développent assez souvent avec des PME et sont source de création de nombreuses start-ups.

Tableau 1 : Analyse SWOT.

Forces
<ul style="list-style-type: none"> – Fort rayonnement de la communauté nationale (présence dans les revus, prix internationaux). – Continuum recherche fondamentale – recherche appliquée très attractif. – Recherche en lien direct avec les grands enjeux sociétaux. – Participation à de nombreux réseaux (GDR, structures internationales, associations)
Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> – Fort rayonnement mais dans une communauté internationale restreinte (faible IF des grandes revues). – Image austère de la mécanique notamment – Relations Recherche – Industrie souvent difficiles notamment en raison d'un nombre trop important de modalités de collaborations
Menaces
<ul style="list-style-type: none"> – Nombre de recrutements en baisse et taille modeste de la section 9. – Faible attractivité du statut et concurrence forte de l'industrie et de l'international. – Grande diversité de thématiques → risque de dispersion et absence de culture de base commune.
Opportunités
<ul style="list-style-type: none"> – Les révolutions actuelles (fabrication additive et intelligence artificielle) permettent de revisiter les thématiques fondamentales avec de nouveaux outils. – Un lien fort avec les grands enjeux de société qui sont attractifs auprès des jeunes (santé, environnement, énergie). – Grande diversité de thématiques à traiter → grande liberté de choix.

ANNEXE 1

Signification des sigles et des abréviations

APPAMAT : Apparence des Matériaux

CID : Commission InterDisciplinaire

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CNU : Conseil National Universitaire

DEM : Discrete Element Method

EC : Enseignant – Chercheur

ElytLab : Engineering Science and Engineering
Lyon Tohoku Laboratory

EquipeX : Équipement d'Excellence

FEM : Finite Element Method

FIB : Focused Ion Beam

GDM : Géométrie Différentielle et Mécanique

GDR : Groupement de Recherche

GPU : Graphics Processing Unit

HPC : High Performance Computer

IMust : Institute of Multiscale Science and
TechnologyINSERM : Institut National de la Santé et de la
Recherche MédicaleINSIS : Institut des Sciences de l'Ingénierie et
des SystèmesINSMI : Institut National des sciences mathématiques
et de leurs interactions

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

ITA : Ingénieurs, Techniciens, Administratifs

MANUTECH : Manufacture & Technologie

MANUTECH-SISE : Surface and Interface
Science

MANUTECH-USD : Ultra Surface Design

MD : Molecular Dynamics

META : Matériaux Acoustiques pour l'Ingénierie

PME : Petites et Moyennes Entreprises

RX : Rayons X

SLEIGHT : Surfaces Light EngineerinG Health
and SocieTySNCF : Société Nationale des Chemins de fer
Français

SURFTOPO : Surface Topography

TACT : Le Toucher : Analyse, Connaissance,
simulaTion

SECTION 10

MILIEUX FLUIDES ET RÉACTIFS : TRANSPORTS, TRANSFERTS, PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

Composition de la section

Françoise MASSINES (présidente de section), Karine LOUBIERE (secrétaire scientifique), Jean-Luc BATTAGLIA, Béatrice BISCANS, Jacques BOREE, Pierre BRANCHER (2019-), Patrick CARRE, François CHARRU (2016-2019), Isabelle CHEVALOT, Stéphanie DE PERSIS, Pascale DOMINGO (2016-2018), Hervé DOREAU, Yoël FORTERRE (2018-), Pierre-Alexandre GLAUDE (2018-), Ramiro GODOY DIANA, Khaled HASSOUNI, Chantal LEBORGNE, Patrick LE QUERE, Jacques MAGNAUDET (2016-2018), Nicolas MORDANT, Aurore NASO, Nolwenn LE PIERRES, Ouamar RAHLI, Konstantinos TERMENTZIDIS.

Résumé

La section 10 fédère les chercheurs autour d'une thématique commune, les milieux fluides et réactifs, dont elle traite toutes les facettes. Cette structuration, unique au niveau national comme international, forme un creuset favorable aux approches multiphysiques et multi-échelles, avec un fort niveau d'intégration des phénomènes couplés, rendu possible par l'essor du calcul intensif et d'outils expérimentaux avec des résolutions temporelles et spatiales élevées. La section 10 regroupe plus de 380 chercheurs répartis dans près de 80 laboratoires, parmi lesquels il existe à la fois des laboratoires comprenant jusqu'à

19 chercheurs de la section et des laboratoires rattachés à onze autres sections et six instituts différents dans lesquels la transversalité des thèmes traités par la section prend tout son sens.

Forte de ce potentiel, la section 10 rassemble une large diversité de compétences et d'expertises pour traiter de sujets fortement ancrés dans les sciences de l'ingénierie. Elle aborde, de façon fondamentale et appliquée, des problématiques allant de l'échelle atomique à celle de la planète afin de lever les verrous scientifiques au cœur de ses disciplines comme dans les zones d'interactions avec les domaines de la physique, des mathématiques

appliquées, des sciences de l'univers, de la chimie, des matériaux, des sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC), de la biologie et de la santé. Les domaines d'application dans lesquels les milieux fluides et réactifs jouent un rôle clé ne cessent de s'élargir et de se renouveler pour répondre aux problématiques sociétales et économiques. Les milieux fluides et réactifs seront ainsi au cœur des enjeux d'au moins 7 des Objectifs du Développement Durable à l'Horizon 2030. Assurer cette flexibilité nécessite de veiller à constamment consolider et enrichir un socle de connaissances scientifiques fondamentales aptes à générer des solutions en rupture.

Sans être exhaustif, ce rapport est une photographie de l'ensemble de la communauté qui étudie les milieux fluides et réactifs ; communauté qui inclut environ 2 500 enseignants-chercheurs. Il met en avant les thématiques fortes et émergentes des 5 grandes disciplines constitutives de la section 10 : la mécanique des fluides ($\approx 45\%$ des chercheurs), la thermique et l'énergétique ($\approx 10\%$), les plasmas et les lasers ($\approx 20\%$), la combustion ($\approx 10\%$) ainsi que le génie des procédés ($\approx 15\%$). Il formule aussi des recommandations.

I. Mécanique des fluides

La mécanique des fluides, qui s'est historiquement développée autour de l'hydraulique, de l'hydrodynamique et de l'aérodynamique pour leurs applications traditionnelles, civiles ou militaires, ainsi qu'en géophysique en raison de son importance en météorologie, s'est considérablement diversifiée ces dernières années. Elle s'est ainsi progressivement tournée et ouverte vers d'autres thématiques scientifiques et finalités applicatives, dans le domaine de l'énergétique et des transferts, de la combustion, du génie des procédés, de l'environnement, et plus récemment vers le domaine du vivant, des biotechnologies et de

la santé. Parallèlement, des progrès méthodologiques considérables ont été accomplis, permettant de dénouer la complexité des phénomènes sous un triple éclairage, théorique, expérimental et numérique, renouvelant ainsi sans cesse le champ des questionnements scientifiques.

A. Positionnement international, structuration

Au plan international, la Mécanique des Fluides française bénéficie d'une très forte reconnaissance, comme attesté par le nombre de chercheurs impliqués dans la gouvernance et le fonctionnement des sociétés savantes (EUROMECH, IUTAM), par la très forte présence française dans tous les grands congrès internationaux généralistes ou plus spécialisés, ainsi que par l'implication nationale dans les comités éditoriaux des revues majeures du domaine. Cela se traduit d'un point de vue quantitatif : la France est ainsi le troisième pays, après les États-Unis et le Royaume-Uni, comptant le plus de publications dans la revue internationale référence du domaine, «*Journal of Fluid Mechanics*» ; elle est également deuxième en nombre de publications derrière les États-Unis dans les deux autres revues majeures du domaine, «*Physics of Fluids*» (IOP) et «*Physical Review Fluids*» (APS). Il est également significatif que les chercheurs français aient été majoritaires au sein des experts internationaux interrogés en 2018 par le Burgers Centrum (Pays-Bas) pour établir leur rapport de prospective sur «*la mécanique des fluides du prochain siècle*».

Au plan national et au sens CNRS du terme, incluant les composantes universitaires, la Mécanique des Fluides est actuellement structurée au sein d'Unités de Recherche rattachées en principal à l'INSIS. Un certain nombre de laboratoires non rattachés en principal à l'INSIS hébergent également une composante Mécanique des Fluides dont les chercheurs relèvent de la section 10 du CoNRS, ou de la section 60

du CNU. Des chercheurs relevant d'autres sections du CoNRS (2, 5, 18, 19, 41 notamment) effectuent également une recherche en Mécanique des Fluides dans des laboratoires relevant en principal d'autres instituts (INP, INSU, INSMI). En outre, en raison de ses nombreuses finalités applicatives traditionnelles dans les domaines de l'ingénierie (aéronautique, énergie, etc.) et de la météorologie, la Mécanique des Fluides s'est développée au sein de grands organismes (CEA, ONERA, EdF, INRIA, IRSN, IRSTEA, IFPEN, IFREMER, IFSTAR, METEO-France), avec lesquels la communauté académique entretient des liens étroits, notamment en raison des orientations des finalités applicatives des agences de moyens (UE, ANR, CNES, DGA, ADEME).

Par ailleurs, un certain nombre de GdR structure la communauté sur des sujets spécifiques (turbulence, contrôle, Énergies Marines Renouvelables, biomécanique, etc.). Ces GdR sont une plus-value considérable. Ils constituent un cadre important de structuration des sous-thématiques, permettant les nécessaires contacts avec les communautés des différents instituts et organismes pour développer les compétences interdisciplinaires et confronter, développer, les méthodologies. De ce point de vue on ne peut que regretter l'échec de la création du GdR « Dynamique des Fluides Géo- et Astro-physiques », qui aurait été l'occasion de fédérer fortement les recherches en mécanique des fluides trans-instituts (INSU, INP, INSIS).

B. Analyse des thématiques de recherche, développements récents et enjeux

Il est toujours frappant de constater la très grande diversité phénoménologique décrite par les équations de Navier-Stokes, pourtant connues depuis près de deux siècles. Ces équations décrivent en effet des situations aussi différentes que les écoulements supersoniques, les écoulements rampants, et toute la gamme

intermédiaire de vitesses, couvrant une gamme considérable d'échelles spatiales, des échelles géophysiques à celles des micro-organismes. Cette pluralité de situations conduit à des spécialisations en sous-disciplines porteuses de problématiques distinctes, qui suscitent des développements méthodologiques spécifiques – théoriques, expérimentaux ou numériques – au sein de laboratoires ayant chacun développé au cours de leur histoire une culture propre.

Ce rapport présente tout d'abord un bref survol des avancées récentes et enjeux majeurs des huit sous-thématiques structurant actuellement la Mécanique des Fluides.

1. Turbulence (phénoménologie, modélisation, mélange, particules)

La turbulence reste un enjeu fondamental, comme attesté par le fait qu'elle soit l'objet d'un des prix du millénaire non encore résolu. Sur le plan conceptuel, les piliers de notre compréhension, qui sous-tendent la modélisation des écoulements turbulents utilisés quotidiennement dans l'industrie, sont revisités actuellement de façon très active en associant modélisation physique, simulation directe, calcul intensif et expérimentation lourde. Au regard du très large spectre d'échelles spatiales et temporelles impliquées, les enjeux propres à la section concernent en particulier la turbulence hors équilibre ou instationnaire, ainsi que la turbulence au voisinage de parois ou d'interfaces, qui gouverne la force de traînée en aérodynamique et les transferts de chaleur et de masse dans les procédés industriels et les milieux naturels. En termes de modélisation, des études fines de type simulation directe permettent aujourd'hui d'accéder à l'ensemble des quantités physiques. Les modélisations des grandes échelles (LES) et hybrides (LES-RANS) en proche paroi font l'objet d'efforts soutenus pour traiter de situations où les résolutions spatiales nécessaires pour résoudre les échelles de turbulence conduisent à des coûts de calcul excessifs. On notera également l'émergence de l'application de l'assimilation

de données à la mécanique des fluides numérique, l'objectif global étant de contribuer à l'amélioration de la prévision numérique d'écoulements complexes.

La turbulence en situation de couplages (stratification, rotation) est également un sujet d'étude très actif, en raison de ses applications directes dans les machines tournantes ou dans les situations d'intérêt géophysique ou astrophysique, des liens étroits existant avec les communautés correspondantes. Un domaine en pleine activité est celui de la turbulence d'ondes internes de gravité ou d'inertie, ce qui s'explique par une phénoménologie très similaire à celle de la turbulence homogène isotrope, mais également par son importance en océanographie où par exemple, la paramétrisation du mélange de l'océan est nécessaire pour maintenir les grandes circulations océaniques d'importance dans les modèles climatiques.

Au-delà de ces situations purement hydrodynamiques, des phénomènes multiphysiques additionnels (acoustique, thermique, électromagnétisme, coexistence de phase avec ou sans changement de phase, réactions chimiques) enrichissent la problématique et élargissent les domaines d'application, notamment vers le génie des procédés, la combustion et les plasmas. Cette turbulence se retrouve également dans le contexte astrophysique avec les ingrédients supplémentaires de la magnétohydrodynamique et des plasmas (vents solaires, cœurs d'étoiles, disques d'accrétion). La turbulence superfluide reste également un sujet d'actualité, partagé avec la communauté physicienne en tant que paradigme de mise à l'épreuve de la théorie de la turbulence homogène isotrope.

Enfin, un domaine particulièrement actif, sur lequel la communauté nationale joue un rôle majeur sur le plan international, est celui des propriétés de dispersion et de mélange de particules ou de bulles dans un écoulement turbulent, tout particulièrement en ce qui concerne une variété de particules, déformables ou encore actives, en lien avec des finalités biologiques ou biomécaniques. L'enjeu est ici de déterminer les forces s'exerçant sur ces particules ou bulles dans le but d'en proposer des modélisations macroscopiques pour des codes

de suivi lagrangien, à des fins industrielles, environnementales ou biomédicales.

2. Écoulements compressibles (super et hypersonique, gaz raréfiés, ondes de choc, aéro-acoustique)

Dans ce domaine traditionnel, renouvelé par des enjeux de santé publique (nuisances sonores) ou de nouvelles perspectives technologiques (micro systèmes gazeux), les efforts de modélisation des effets de compressibilité doivent être maintenus. La prise en compte des effets de thermodynamique hors équilibre et des interactions moléculaires sont également un enjeu important.

En aérodynamique, les interactions choc-couche limite constituent toujours une problématique d'importance, en liaison notamment avec les instabilités de couplage fluide-structure et les phénomènes de fatigue des matériaux. En parallèle, l'augmentation continue du trafic aérien et les contraintes environnementales croissantes imposent de continuer à progresser dans la compréhension, l'identification et la réduction des sources de bruit à grande vitesse.

Dans le domaine spatial, la question des instabilités fluide-structure induites par les couplages entre les jets supersoniques non-adaptés et les résonances thermoacoustiques et mécaniques des structures reste un sujet d'actualité, partagé avec les communautés de la mécanique des structures et de la combustion. Les effets d'hydrodynamique dans les propulseurs plasma, et les problèmes d'érosion induits, constituent également un champ partagé avec la communauté plasma.

3. Instabilités et contrôle (transition à la turbulence, effets non linéaires, modèles réduits, apprentissage)

L'étude des instabilités hydrodynamiques a fait de grands progrès dans les années 1990, par le développement des concepts d'instabi-

lité convective et absolue, de mode global, de réceptivité aux perturbations, et de perturbation optimale. Les développements non linéaires se sont largement appuyés sur la théorie des systèmes dynamiques, notamment pour l'étude de la transition à la turbulence. Ces concepts ont permis d'étendre considérablement l'accord entre observations expérimentales et calculs. Ils font aujourd'hui partie du « bagage culturel » des mécaniciens des fluides, et sont largement utilisés dans des situations très variées.

Les développements récents portent sur les écoulements inhomogènes, stratifiés en densité ou en température, en raison de leur intérêt en météorologie, en océanographie, ou dans les procédés. La présence de parois nécessite une meilleure compréhension de l'influence de la rugosité sur des mécanismes d'instabilité et de transition vers la turbulence, notamment par les effets de non-normalité et de transition by-pass.

Un domaine toujours actif est la manipulation et le contrôle d'écoulements ouverts au voisinage de la transition à la turbulence, à l'aide de techniques d'optimisation faisant appel aux concepts d'équations adjointes, du contrôle optimal, ou du contrôle en boucle fermée. Les derniers développements mettent en œuvre des méthodes de contrôle sur la base de modèles réduits issus des techniques d'apprentissage sur des données expérimentales ou numériques, couplées avec des algorithmes de contrôle en boucle fermée. Si l'on ne comprend pas toujours les raisons de la réussite de ces méthodes, ici comme dans d'autres domaines scientifiques, les résultats obtenus incitent à poursuivre l'effort dans cette direction sur laquelle la communauté nationale est très bien positionnée.

Sur le plan applicatif, un enjeu ambitieux consiste à manipuler un écoulement turbulent, ce qui suppose de disposer d'un modèle réduit de la dynamique de l'attracteur (ce modèle pouvant être atteint par différentes techniques : stabilité linéaire autour du champ moyen, techniques de machine learning sur des données couplant expérience et calcul) dans le but de le déplacer dans l'espace des phases en vue de

modifier ses propriétés statistiques. Les champs applicatifs concernent l'aérodynamique ainsi que les propriétés de transfert ou de mélange.

Les domaines encore largement ouverts concernent les instabilités de systèmes couplés, faisant intervenir notamment des interactions fluide-structure (ce champ est dynamisé par le développement des énergies marines et éoliennes et de l'aérodynamique des ailes souples), ou des couplages avec des phénomènes thermiques ou réactifs (instabilités de combustion).

Enfin, un domaine classique, mais dans lequel les progrès sont relativement lents au regard des efforts mobilisés, est celui des instabilités magnétohydrodynamiques, dont les finalités concernent tant la géophysique (genèse du champ magnétique terrestre et ses renversements), que l'industrie métallurgique, ou plus récemment le stockage de l'énergie (batteries à métaux liquides).

4. Ondes de surface et ondes internes (hydrodynamique navale, océan et atmosphère, événements extrêmes, morpho-dynamique côtière)

Le domaine des écoulements à surface libre a longtemps été intimement lié à l'hydrodynamique navale, en raison des questions de résistance à l'avancement ou de tenue à la mer des engins flottants. C'est un domaine correspondant à des écoulements à grand nombre de Reynolds, dans lequel les capacités prédictives des outils de conception reposent toujours sur l'amélioration des lois de turbulence de paroi (cf. section 1), dans un contexte de géométrie complexe.

L'essor des énergies marines renouvelables a enrichi le domaine de nouvelles problématiques, liées à la prédiction des états de mer, à leur évolution sur des fonds variables, à leur caractérisation spectrale, à l'interaction entre houle et obstacles fixes ou flottants, et à la compréhension de l'impact environnemental des systèmes, notamment sur le plan hydro-sédimentaire. Une attention particulière doit

être portée, en lien avec la physique non-linéaire, aux événements extrêmes, comme les vagues scélérates ou les tsunamis générés par les phénomènes sismiques. Au-delà des récits de marins, ces événements sont aujourd'hui mieux appréhendés grâce à la finesse spatio-temporelle atteinte par les moyens d'observation, notamment satellitaires. Ces avancées permettent la reconstitution d'états de mer, mieux résolus grâce à l'assimilation de données et à l'amélioration de l'identification de zones potentiellement dangereuses.

Notons encore l'importance croissante de la modélisation des zones littorales. L'impact des tempêtes est devenu ces dernières années un enjeu sociétal préoccupant, tant du point de vue de la sécurité des personnes et des biens, qu'en raison des conséquences des mouvements sédimentaires sur la morphologie du littoral. Par ailleurs, cette zone littorale est un biotope d'importance majeure et l'interaction entre dynamique des vagues et végétation fait également l'objet d'un nombre croissant d'études.

Enfin, l'étude des écoulements en eau peu profonde, au-delà de ses applications traditionnelles en hydraulique qu'il convient de poursuivre (notamment pour simuler de manière unifiée l'ensemble des situations – mouillé/démouillé, crues, etc.), offre des analogies stimulantes avec différents phénomènes de physique fondamentale, ouvrant ainsi des collaborations avec les communautés correspondantes.

5. Interactions fluide-structure (structures rigides, structures souples, poroélasticité, vol et nage, végétaux)

Un des problèmes les plus classiques de la Mécanique des Fluides est le détachement tourbillonnaire derrière des obstacles, où l'enjeu est de prédire la fréquence du détachement en fonction du nombre de Reynolds, tant pour son intérêt fondamental que pour son importance pratique (tenue des ouvrages). Ce problème se trouve réactualisé dans le contexte du développement des énergies renouvelables, éoliennes ou hydroliennes. Les questionne-

ments correspondants concernent en particulier la compréhension des interactions de sillages, en lien avec l'optimisation de l'implantation de fermes d'éoliennes, dans le but de maximiser leur production et d'assurer une longévité maximale et des conditions sûres de fonctionnement.

Par ailleurs, l'évolution des techniques de fabrication permet aujourd'hui de disposer de surfaces à géométrie variable (ailes souples), dont la forme peut varier de manière passive ou active en fonction des conditions opératoires. Le thème de l'interaction fluide-structure est ainsi renouvelé sur le plan expérimental ainsi qu'en termes de modélisation et de simulation numérique.

Enfin, notons que cette sous-thématique a débordé le champ des applications traditionnelles pour s'ouvrir vers les sciences du vivant, par exemple vers les problèmes concernant les écoulements biologiques ou ceux issus de la propulsion animale (nage de poissons, vol d'insectes ou d'oiseaux). Parmi les questions récurrentes se trouve celle du couplage entre la dynamique tourbillonnaire et l'élasticité du corps en mouvement, ainsi que les questions de texturation ou de fonctionnalisation des surfaces.

6. Interfaces (thermohydraulique, microfluidique, bulles, pulvérisation, mouillage et glissement, milieux poreux)

Au-delà de ses applications traditionnelles, le domaine des écoulements multiphasiques a bénéficié ces dernières années de nets progrès dans le domaine des techniques expérimentales (tomographie, caméras rapides, etc.), qui ont donné à percevoir une phénoménologie toujours plus riche et détaillée. Des progrès considérables ont également été réalisés dans le domaine de la modélisation et de la simulation numérique avec différentes techniques de prise en compte de l'interface ou des inclusions, des forts contrastes de densité et de viscosité, et de la tension de surface. Dans ce domaine, la communauté française se situe au tout premier plan international, avec le déve-

loppement et la mise à disposition de plusieurs codes de simulation numérique, dont certains ont su s'imposer à l'échelle internationale. Ces outils ont permis de réaliser des avancées spectaculaires dans l'amélioration des capacités prédictives, notamment en matière de fragmentation et d'atomisation de jets liquides, et ainsi de revisiter les lois d'échelle entrant dans les modélisations à un fluide unique équivalent couramment utilisées chez les partenaires industriels. Ils ont également donné accès à des connaissances majeures dans l'identification des mécanismes élémentaires gouvernant les trajectoires de bulles ou de gouttes, ainsi que dans la détermination des forces hydrodynamiques entrant dans des modélisations plus globales de trajectoires de populations de bulles.

L'étude des milieux poreux constitue un autre thème majeur. Il s'est élargi à la fois du point de vue de la modélisation et des expériences vers les milieux déformables, réactifs et multiphasiques autour de questions ouvertes sur le séchage, la dissolution, le transfert de masse et de chaleur, en lien avec des problématiques liées aux milieux géologiques, manufacturés ou biologiques.

Au-delà des applications traditionnelles en thermo-hydraulique et en génie des procédés, des ouvertures nouvelles sont apparues, vers la microfluidique (micro-échangeurs, micro-réacteurs, lab on chip) et même la nanofluidique (nanotubes, membranes). Les phénomènes interfaciaux et les conditions aux limites de glissement prennent ici une importance déterminante dans la dynamique des écoulements et les propriétés de transfert et de mélange. Ces travaux sont réalisés en lien avec la communauté du génie des procédés, dans les domaines de l'environnement et l'énergie (désalinisation, conversion d'énergie par couplage électro-osmotique).

Enfin, un enjeu actuel important réside dans la prise en compte du changement de phase liquide-vapeur en présence d'une interface solide (cavitation hétérogène, ébullition), ainsi que les problèmes liés à la dynamique des lignes de contact triple et à leur modélisation (hystérésis, mouillage sur des solides mous).

7. Fluides complexes et milieux divisés (pâtes et boues, émulsions, milieux granulaires, gels, suspensions actives, mousses et poudres)

La notion de fluide complexe s'est considérablement élargie ces vingt dernières années, passant des fluides non-newtoniens classiques, déjà riches de par la multiplicité de leurs lois de comportement (fluides à seuil, visco-élastiques, etc.), à des fluides plus complexes, tels que les pâtes et boues, les émulsions et gels, ou encore la matière active d'origine biologique. Un domaine connexe est celui des milieux granulaires ou fibreux, où se manifestent des effets fortement non linéaires (formation d'agrégats ou de bandes de cisaillement, des transitions solide-fluide). Ce sont des sujets d'importance majeure compte-tenu de leurs applications industrielles (industries cimentière, cosmétique, agroalimentaire, galénique, chimique), ou environnementales (transport sédimentaire) liées aux risques naturels ou aux conséquences du changement climatique.

Les défis scientifiques ont trait à l'élaboration de lois de comportement de type milieu continu, en particulier dans des régimes de fortes concentrations où des travaux récents ont mis en évidence le rôle crucial des contacts solides et du frottement dans les suspensions denses, unifiant le comportement des suspensions et des milieux granulaires. Les mousses, les tensioactifs et leur effet sur l'hydrodynamique des films et la rhéologie constituent un autre sujet en plein développement. Pour toutes ces questions, l'impact et le rôle de la physico-chimie à l'échelle locale (cohésion, répulsion, mouvement Brownien, élasticité) sur les phénomènes macroscopiques restent à évaluer plus précisément. Un autre sujet porteur concerne l'élaboration en mode « reverse engineering » de milieux aux propriétés macroscopiques contrôlées ou ajustables.

Dans ce domaine, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques de changement d'échelle couplant les échelles microscopiques et l'échelle du continu, en s'assurant du caractère bien-posé des modèles proposés en vue

de leur résolution numérique, et également du recours à des développements expérimentaux originaux pour voir dans l'opaque, à base de tomographie RMN, X-ray, acoustique. Des collaborations fructueuses entre mécanique, mathématiques appliquées, génie des procédés et physico-chimie sont à intensifier.

8. Mécanique du vivant (circulation du sang et des voies aériennes, morphogénèse, bio-mimétisme, végétaux, comportements collectifs, pathologies, etc.)

Longtemps délaissée en tant que déterminant de la structuration et des fonctionnalités du vivant au profit de la génétique, la Mécanique des Fluides est revenue en force ces dernières années dans les sciences du vivant. Il s'agit ici de modéliser la circulation du sang ou des voies aériennes, la croissance d'une tumeur, ou de comprendre le transport de l'eau dans les plantes ou l'influence du vent sur leur croissance, avec en toile de fond des préoccupations de santé, de biologie (morphogénèse, mécano-perception), d'environnement ou d'agronomie. Dans un premier temps, cette évolution a conduit à s'intéresser aux objets individuels (cellules, vésicules, écoulements intracellulaires, etc.). Elle s'est enrichie plus récemment de problématiques liées aux populations d'organismes cellulaires, à leur croissance et leur migration dans des milieux ou sur des substrats variés, irriguant ainsi la communauté de nouveaux questionnements. De nouvelles perspectives s'ouvrent maintenant vers l'élaboration de composants ou systèmes biomimétiques permettant de reproduire de manière synthétique des comportements multi-fonctionnels caractéristiques des systèmes vivants.

Enfin, au-delà de la compréhension de ces interactions particulièrement complexes entre écoulements et milieux vivants, la Mécanique des Fluides joue également un rôle important dans le développement de diagnostics médicaux plus performants et plus personnalisés

(microfluidique, lab-on-chip, insuffisance respiratoire) ainsi que dans la conception et le développement de dispositifs de palliation de pathologies humaines (cœur artificiel, stents, larynx artificiel).

C. Analyse des forces et faiblesses, recommandations

La Mécanique des Fluides est une discipline au carrefour de nombreux champs disciplinaires qui débordent largement les sciences de l'ingénieur et avec lesquels elle partage de nombreux questionnements scientifiques. Une de ses caractéristiques est qu'elle n'est pas définie à partir de finalité(s) applicative(s). Elle n'étudie pas un objet, mais fournit les méthodes et concepts indispensables dans de très nombreuses disciplines et applications. Elle embrasse ainsi une très grande diversité phénoménologique qui entraîne des spécialisations en sous-disciplines distinctes. Cette situation est favorable du point de vue de la reconnaissance de son importance, mais présente néanmoins le risque d'une perte de vision unificatrice et de la maîtrise de ses questionnements propres, risque accentué par les politiques actuelles de financement sur appel à projets mettant en avant de manière quasi-systématique les finalités applicatives. Il paraît donc nécessaire de revenir à une situation plus équilibrée, en particulier dans les appels à projets de type ANR, sans même parler de revaloriser de manière significative les taux d'acceptation des projets.

Si la communauté nationale est perçue comme forte hors de nos frontières, sa diversité et son écartèlement entre différentes institutions et différents organismes peut être source d'une certaine fragilité institutionnelle, situation aggravée par l'absence d'une société savante qui porterait ses intérêts spécifiques, à l'instar de la Société Française de Thermique, de la Société Française de Génie des Procédés, du Groupement Français de Combustion. Un manque à combler?

II. Thermique et Énergétique

A. Positionnement international, structuration

La Thermique et l'Énergétique sont centrées sur l'étude et l'optimisation des transferts, de la récupération, de la conversion ou du stockage de l'énergie dans les matériaux et les systèmes. À ce titre, elles sont étroitement liées aux autres disciplines de la section 10. Au-delà, la thermique est présente aux interfaces avec la chimie, la physique et le vivant notamment. Le grand nombre de projets collaboratifs, nationaux et internationaux, académiques ou avec l'industrie atteste de son rôle incontournable dans la réponse à des défis sociétaux majeurs. Cette vitalité se confirme également au travers du nombre toujours croissant de publications ainsi que de la forte évolution du contenu pédagogique de l'enseignement qui a eu lieu ces dernières années au sein des universités et des écoles d'ingénieurs. La communauté dispose aussi de plateformes uniques au monde comme celle pour le solaire sous très forte concentration.

B. Analyse des thématiques, développements récents et enjeux

1. Thématiques et développements

Les nouveaux développements, tant sur les aspects théoriques méthodologiques qu'expérimentaux sont liés aux évolutions technologiques des appareils de mesure, à l'élaboration de nouveaux matériaux et à l'augmentation continue des capacités et des méthodes de calcul intensif. Ainsi, le développement de nouveaux instruments de mesure de champs

a augmenté l'échelle d'observation spatiale, de la matière condensée (nano-thermique) jusqu'à la thermique des zones urbaines ou du globe. Les répercussions sont également sensibles sur le domaine temporel exploré, de la fraction de picosecondes jusqu'à plusieurs années. La nano-thermique a connu un essor considérable via l'exploitation de nouveaux phénomènes, processus et fonctionnalités qui résultent du comportement singulier des porteurs de la chaleur (électrons, phonons, photons) dans des nanostructures ou des matériaux structurés. La dématérialisation du Kelvin par l'utilisation de la constante de Boltzmann est un point à souligner, qui rappelle les liens étroits avec la physique statistique.

D'autre part, l'augmentation des capacités de calcul intensif et des méthodes numériques permet de prendre en compte de manière de plus en plus précise le caractère multiphysique et multi-échelle d'une observation. Cette nouvelle possibilité ouvre non seulement la voie à de nouvelles techniques de simulation, mais permet aussi de répondre à des questions complexes relatives au changement d'échelle ; ces évolutions trouvent notamment des applications dans le domaine des milieux divisés, tel que les milieux poreux, mais aussi pour les transferts dans les écoulements granulaires ou particulaires. Les évolutions des méthodes numériques offrent également des perspectives importantes pour la prise en compte plus précise de phénomènes couplés, non-linéaires et possédant des dynamiques différentes, que ce soit entre différents modes de transfert ou dans le couplage avec d'autres physiques (écoulements fluides, chimie).

Ces évolutions entraînent une augmentation considérable de la quantité de données mise en jeu tant du point de vue de la mesure (champs en 2D ou tomographie en 3D) que des résultats de simulation, quantités d'autant plus grandes que l'on s'intéresse à des phénomènes transitoires. De nombreux progrès ont été réalisés pour réduire la quantité de données au travers de techniques statistiques inférentielles (le Big Data), la recherche de modèles compacts (pour le rayonnement des gaz par

exemple) ou bien la dimension des modèles (réduction ou identification de modèles).

Il est important de mentionner les développements dans les techniques dites « inverses », consistant à confronter mesures et simulations, dont une application importante est l'optimisation et le contrôle de procédés énergétiques en temps réel. Si cette application portait plutôt sur des critères macroscopiques jusqu'ici, les développements récents laissent entrevoir la possibilité d'optimisation sur des critères plus locaux, améliorant ainsi la finesse de l'optimisation. Notons également que l'intelligence artificielle a fait d'énormes progrès ces dernières années aussi dans la Thermique-Énergétique, et le développement des techniques d'apprentissage automatique (machine learning) trouve aujourd'hui des applications dans le design de matériaux aux propriétés thermiques prescrites a priori.

2. Enjeux

La Thermique-Énergétique se trouve à la croisée de cinq enjeux sociétaux : la transition énergétique et le développement durable, l'industrie du futur, les sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC) et la santé.

La **transition énergétique et le développement durable** passent par la définition de nouvelles sources d'énergie à l'échelle globale, mais aussi par l'utilisation raisonnée d'énergies alternatives où le stockage, le transport, l'échange transitoire et contrôlé sont des enjeux clés. De nombreux travaux de recherche se focalisent sur la caractérisation et la mise en œuvre de matériaux nouveaux : matériaux biosourcés, matériaux à changement de phase, nanofluides, fluides supercritiques, matériaux pour la conversion thermo-photovoltaïque et matériaux pour le transport de la chaleur par rayonnement. Des questionnements restent ouverts, concernant en particulier la conversion et le transfert d'énergie pour la pile à combustible, les systèmes thermoélectriques et les machines thermiques. La dissipation de la chaleur contrôlée aux très petites échelles

pose actuellement des questions aux frontières entre thermique et physique de la matière condensée (thermotronics ou cristaux phononiques). La thermique du bâtiment occupe toujours une place particulière dans la transition énergétique. Les enjeux en recherche sont relatifs à la modélisation multi-échelle et aux couplages à l'échelle des zones urbaines, pour laquelle il est nécessaire d'intégrer les réseaux intelligents (réseaux thermiques intelligents et hybrides). Les applications concernent la préservation du patrimoine et la qualité de l'air. Enfin, la gestion de l'énergie thermique dans les futurs systèmes de propulsion électrique (automobile et aérienne) est un champ en évolution rapide. La Thermique joue aussi un rôle en émergence dans le recyclage des matériaux, notamment les composites et les métaux précieux et terres rares dans les dispositifs électroniques.

L'apparition récente de nouvelles méthodes de conception et de fabrication dans **l'industrie du futur** est en partie due à l'instrumentation et au traitement des données générées à partir de modèles multi-physiques et multi-échelles. Il est donc envisageable d'appréhender l'évaluation non-destructive des propriétés des objets lors de leur fabrication. La prise en compte de l'environnement thermique du procédé sur la micro-structuration des matériaux est incontournable en regard des performances attendues. La thermique occupe une place importante dans l'étude des procédés de fabrication additive, incluant les critères de consommation énergétique et de performances thermiques dans la gestion de flux de production. L'association de la métrologie et de « jumeaux » numériques engendre de nouvelles méthodes de conception et de fonctionnement optimal de systèmes robotiques ainsi que la commande et le suivi de systèmes thermiques et thermodynamiques. Enfin, l'utilisation optimale de l'énergie dans l'industrie rejoint les problématiques de transition énergétique.

Dans le domaine des **STIC**, l'utilisation de composants électroniques nanostructurés entraîne des enjeux expérimentaux pour la mesure des propriétés thermiques à des échelles sub-micrométriques, le problème

majeur restant ici en lien avec la quantification des mesures. On retrouve ces enjeux pour la modélisation autour des couplages de porteurs élémentaires à ces petites échelles ainsi que le couplage avec le continuum environnant. Les systèmes thermodynamiques sont aussi des objets d'étude intéressants à ces petites échelles. Le développement des MEMS/NEMS ouvre encore de nouvelles perspectives pour la métrologie, les actionneurs thermiques ou le fonctionnement en conditions extrêmes aux petites échelles. La multiplication de capteurs multiphysiques dans les systèmes (thermique du bâtiment, procédés de mise en forme des matériaux) implique aussi le développement de méthodes adaptées de gestion et d'analyse des données. Les problématiques de stockage d'énergie sont aussi réelles en vue du fonctionnement de capteurs autonomes, connectés, miniaturisés ou adaptés à des conditions sévères.

La **thermique du vivant** reste un domaine complexe et donc générateur de nombreuses collaborations entre thermiciens, biologistes, chimistes, médecins. De nombreux développements expérimentaux d'imagerie thermique 3D restent nécessaires pour atteindre et neutraliser des tumeurs au travers de méthodes thermiques. Les traitements par laser nécessitent un contrôle beaucoup plus complexe de la gestion des sources de chaleur en milieu biologique et le développement théorique des interactions laser-vivant. Le caractère multi-échelle est aussi fortement présent dans ces milieux biologiques et la microscopie thermique du vivant est un axe qui doit se développer. La résistance de l'homme aux conditions thermiques extrêmes est une application qui rentre dans le cadre général de l'homme augmenté. Dans ces applications on retrouve souvent le concept de thermique « bio-inspirée » ou « bio-mimé ».

transition énergétique, le développement durable et l'industrie du futur, mais également la santé et la société numérique. Ces enjeux convoquent la thermique et l'énergétique sur des gammes d'échelles étendues, sur les plans spatial et temporel comme en termes de puissance ou de quantités d'énergie, nécessitant de nouveaux développements méthodologiques. Il en est de même pour répondre à des objectifs d'optimisation et d'amélioration de l'efficacité énergétique où la thermique est généralement perçue comme un phénomène limitant. Les développements métrologiques et numériques aidant, on constate que la recherche en thermique se place à des échelles spatiales et temporelles de plus en plus petites. Le lien méthodologique avec des finalités applicatives se situant à des échelles macroscopiques devient alors problématique. Ainsi, la thermique des zones urbaines est un bon exemple de cette difficulté. L'analyse des derniers recrutements effectués pour la discipline thermique au sein de la section 10 témoigne indéniablement de cette difficulté : pratiquement, il est plus facile de convaincre de l'intérêt et de la pertinence d'un projet aux nano-échelles que sur des projets aux échelles urbaines. La communauté de la Thermique-Energétique n'est pas la seule discipline confrontée à cette difficulté, mais elle est tout particulièrement concernée. Concilier la thermique aux nano-échelles et la problématique de l'amélioration des performances thermiques de l'habitat devient un enjeu majeur. Le cloisonnement entre disciplines est également un frein au rayonnement de la thermique en tant que discipline intégrative se situant au cœur du changement d'échelle.

C. Analyse des forces et faiblesses, recommandations

La Thermique et l'Energétique sont au cœur des grands défis sociétaux, en particulier la

III. Plasmas froids et Lasers

Les plasmas de décharge sont des milieux ionisés résultant du couplage d'énergie électromagnétique avec des fluides gazeux, et plus récemment, liquides. Suivant la pression et le mode de couplage, ces plasmas sont proches

de l'équilibre thermodynamique (plasma thermique) ou hors équilibre (plasma froid). Dans les procédés lasers, l'énergie photonique transmise à un solide induit des changements de phase allant jusqu'à l'émission et l'ionisation de la vapeur. Le comportement et les caractéristiques de ces milieux ionisés, comme les procédés qui en découlent, sont gouvernés par des phénomènes fortement corrélés. Ces plasmas se différencient des plasmas de fusion (section 4) par leur caractère hors équilibre et/ou collisionnel, mais aussi par les phénomènes aux parois (électrodes).

A. Positionnement international, structuration

Les recherches conduites dans la communauté plasma-laser de la section 10 s'appuient sur une approche pluridisciplinaire pour traiter, de manière intégrée, les problématiques de physique des décharges (phénomènes de claquage), de physique des plasmas et des lasers (processus élémentaires, effets collectifs, interaction onde-plasma), physique atomique et moléculaire, cinétique chimique, changement de phases, phénomènes de transport, interactions plasma/matériau et laser/matériau. Cette communauté réunit des chercheurs de disciplines différentes travaillant aux interfaces avec le génie des procédés, la thermique, la mécanique des fluides, la combustion, le génie électrique, la chimie, la biologie, le biomédical, la science des matériaux et la micro électronique.

Au sein du CNRS, il existe des interactions entre les communautés « plasmas froids/procédés lasers » de la section 10 et « plasmas chauds » de la section 4 au niveau des travaux de la Fédération de Recherche FR3029 FCM-ITER sur la Fusion par Confinement Magnétique et de l'interaction laser/matière à haut flux. La communauté interagit également avec les sections 8 (micro- et nano- technologies, énergie électrique et photonique), 9 (ingénierie des matériaux : couches tribologiques, de protec-

tion des métaux, céramiques), 15 (chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés) et 28 (Ingénierie et technologies pour la santé).

Au niveau national, la communauté plasma-laser, qui comprend environ 70 chercheurs et 300 enseignants chercheurs, se structure autour du « Réseau Plasmas Froids », créé en 2002, et du réseau « FEMTO » créé en 1997. Leur existence permet de transmettre les fondamentaux et de suivre l'évolution des techniques expérimentales et de modélisation pour enrichir le socle des connaissances indispensables à toute innovation. Soulignons que les avancées récentes dans la compréhension des mécanismes et phénomènes qui gouvernent ces milieux ionisés, leurs interactions avec l'environnement et les procédés associés ont été obtenues grâce au développement massif des outils de diagnostics et de modélisation numérique. Notons également que le GDR ACO-CHOCOLAS « Action Concertée pour l'Étude des Matériaux sous très grandes Vitesses de Déformations » regroupe la communauté Laser. En revanche, si les GDR HAPPYBIO « Application des procédés physiques à la biologie » et l'IRN « Nanomatériaux multifonctionnels » impliquent plusieurs équipes plasmas, il n'y a plus de GDR relevant spécifiquement des plasmas.

Au niveau international, les équipes plasma-laser interagissent très fortement avec des laboratoires étrangers. Si ces collaborations sont structurées par l'existence de LIA (MINOS avec la Grèce, LIPES avec le Luxembourg, KAPPA avec la Russie), d'un master international (STC avec le Canada), d'ITN, c'est surtout dans le cadre d'ANR internationales et de collaborations bipartites avec les meilleures équipes internationales qu'elles se développent. Les équipes françaises se positionnent au premier plan au sein de la communauté internationale plasma-laser. La France, avec les États-Unis et l'Allemagne, sont les seuls pays à se situer systématiquement aux 5 premières places en termes de publications, tant sur les thèmes fondamentaux qu'appliqués ou émergents. Ce positionnement se traduit également par un grand nombre d'invitations à présenter des conférences et une forte activité dans les comités scientifiques des congrès internatio-

naux en lien avec le cœur de la discipline (ICPIG, ESCAMPIG, ISPC, GEC, Gordon, GD, CLEO, COLA, etc.) et les applications des plasmas et lasers (MRS, AVS, PSE, EUCASS, PLATHINIUM (ex. CIP)).

B. Dynamique de la recherche, questions fondamentales et applications

L'émergence de nouveaux champs de recherche avec des thématiques fortes est soutenue par trois dynamiques de recherche interdépendantes. La première est motivée par la capacité des plasmas à répondre aux cahiers des charges de très nombreuses applications dans des secteurs de plus en plus diversifiés. La deuxième est soutenue par le développement de nouvelles alimentations électriques qui permettent d'améliorer le transfert d'énergie vers les espèces du plasma et ainsi de multiplier les sources plasma. D'autant plus que la troisième dynamique liée à l'accès aux plateformes de nanotechnologies et à l'impression 3D a considérablement élargi le panel de configurations des cellules de décharge.

Ces trois dynamiques de recherche conduisent à une complexité croissante des systèmes étudiés : citons par exemple les précurseurs complexes de par leur chimie ou leur nature (particules, aérosols), le plasma dans un milieu multiphasique (gaz, nanoparticules, gouttelettes, liquide, bulles dans un liquide, microfluidique), ou l'évolution vers des échelles spatiales (micro- et nanométriques) et temporelles (décharges impulsives, lasers ultracourts...) de plus en plus petites et vers des milieux de plus en plus denses. Ainsi, si augmenter le niveau d'ionisation du gaz sans le chauffer reste une question clé, à la problématique des plasmas de grand volume succèdent les nouveaux champs de recherche ouverts par les décharges confinées, les décharges dans les liquides, les décharges impulsives subnanosecondes, à haute pression et dans des conditions de très forte surtension. La maîtrise

et la compréhension des instabilités et du transport dans les plasmas basse pression magnétisés connaissent également un très fort développement avec notamment des travaux autour des sources d'ions négatifs, d'intérêt pour ITER, pour les propulseurs ioniques et les procédés de traitement de surface. La recherche sur les plasmas thermiques est dynamisée par des travaux sur la synthèse additive par dépôt de fil à l'arc, le dépôt de couches céramiques par projection thermique, le développement de modèles hors équilibre de la couche plasma aux électrodes, les applications disjoncteurs sans SF₆, etc.

L'exploration de ces nouvelles limites a conduit à l'émergence de nouvelles questions fondamentales sur la physique des décharges, la physique des plasmas et lasers, la physico-chimie des milieux hors-équilibre, l'interaction plasma/laser-surface, etc. De réelles avancées ont eu lieu dans le domaine des diagnostics optiques résolus spatialement et temporellement grâce aux progrès récents sur les sources de photons et les systèmes de détection rapides ainsi qu'à l'utilisation des grands instruments (synchrotron, laser de puissance, maser X). Les cartographies résolues spatialement (μm) et temporellement (ns et en deçà), ainsi que les moyens de calculs haute performance, ont soutenu et permis le développement et la validation de modèles 3D couplant transport, phénomènes collisionnels, transfert radiatif et électro-magnétisme. Des modèles collisionnels radiatifs plus détaillés assurent une exploitation plus approfondie et plus quantitative des diagnostics spectroscopiques et des analyses chimiques du gaz. Les échanges avec les autres communautés de la section 10 ont conduit à l'implémentation d'approches méthodologiques communes, expérimentales et numériques.

Les champs applicatifs les plus traités portent sur les domaines de l'énergie, du biomédical, de la dépollution, de l'efficacité énergétique, des matériaux et des traitements de surface. Notons que plus de la moitié de la communauté plasmas froids et laser s'intéresse à ce dernier domaine où les travaux visent le développement de procédés et systèmes

plasma-laser d'élaboration de matériaux multifonctionnels répondant à un cahier des charges de plus en plus exigeant pour des applications très diversifiées. Des besoins sont très clairement identifiés en nanotechnologies (nano-architecturation, micro-usinage, fonctionnalisation 3D, écriture de guides d'ondes, canaux fluidiques, et autres fonctionnalités lab-on-chip), pour les nanomatériaux (encapsulation de nano-micro-particules, nanostructuration en surface et en volume, films nanocomposites, analyses élémentaires au ppb ICP, LIBS), dans le secteur de l'énergie, notamment sur les aspects liés à la conversion et au stockage (capteurs, piles à combustible, cellules solaires, électrodes de batteries, stockage de H₂, etc.). Les recherches en lien direct avec les nouvelles technologies de l'énergie et l'efficacité énergétique (méthanisation, syngas, assistance de la combustion, contrôle des écoulements) se développent fortement. Les applications médicales ont évolué, depuis la décontamination vers le traitement des tumeurs, avec d'excellents résultats dont l'aboutissement requiert un transfert vers les spécialistes du biomédical. Les nouveaux développements portent sur l'activation du système immunitaire par plasma. Un véritable engouement apparaît pour le traitement de l'eau ou de liquides plus complexes, que ce soit dans le but de remédier des micropolluants persistants ou bien d'activer le liquide. Les domaines d'applications sont autant le biomédical que l'agriculture. L'intégration de plus en plus forte de la finalité conduit les chercheurs à développer de nouvelles formes d'excitation du plasma pour contrôler le procédé, et à envisager des procédés hybrides couplant différentes technologies plasmas ou non.

Grâce à la maturité des nouvelles sources et des applications qui y sont associées, les procédés lasers ont fortement pénétré le milieu industriel renforçant les interactions entre le monde académique et l'industrie. L'interaction laser-matière est affinée par le façonnage spatio-temporel des faisceaux et la modélisation de tous les phénomènes physiques à l'échelle de temps de la femtoseconde. Ces avancées ont ouvert des débouchés dans l'instrumentation rapide, les systèmes optiques

pour le contrôle non destructif (maintenance et réparation) et dans le domaine médical (chirurgie laser, ingénierie tissulaire, thérapie laser).

La modélisation est l'une des forces des équipes plasma dont la reconnaissance internationale est largement établie. Les données de base sont un point clé de cette activité. La France a développé une base de données en « open access » très largement utilisée au niveau international, néanmoins les équipes produisant les données de base sont très fragilisées par les départs des chercheurs et les difficultés de financement. Par ailleurs, bien que plusieurs équipes disposent de modèles fluides adaptés à une diversité de plasmas, il n'existe pas encore de plateforme communautaire comme on en trouve dans d'autres pays ou d'autres disciplines.

C. Analyse des forces et faiblesses, recommandations

Les recherches dans le domaine des plasmas froids et laser sont supportées par un grand enthousiasme national qui place la France à un excellent niveau international. Les équipes se fédèrent pour se donner plus de visibilité dans les AAP et réussissent à progresser sur le plan fondamental comme sur celui de l'innovation technologique. Les chercheurs et enseignants-chercheurs sont présents dans les comités stratégiques de la recherche internationale. Ils sont très bien positionnés sur le plan de la production scientifique et des reconnaissances internationales.

Le maintien/renforcement de l'esprit de communauté essentiel à la coordination des recherches françaises est néanmoins rendu difficile par la dispersion géographique des nombreuses petites équipes qui la constituent. Très peu de laboratoires, au plus 3-4 unités, ont des recherches entièrement dédiées aux plasmas ou aux procédés lasers. L'existence de réseaux, comme des GDR, est primordiale pour le futur de la communauté. En effet, si la diversité des

domaines d'application des plasmas a facilité le succès des chercheurs dans les appels d'offres ciblés sur des domaines d'application, ce mode de fonctionnement a progressivement éloigné les chercheurs du cœur de leur discipline. Cette situation, conjuguée à la diminution drastique du nombre de formations centrées sur les plasmas et les lasers en France, pourrait avoir des conséquences négatives sur le futur de la communauté plasma-laser. Il est donc très important que la communauté ait les moyens de se structurer autour des questions fondamentales.

IV. Combustion et systèmes réactifs

La communauté de la Combustion et des Systèmes Réactifs étudie la combustion, contrôlée ou incontrôlée, et ses conséquences sur le climat et l'environnement. Les travaux allient études expérimentale, théorique et/ou numérique.

La combustion contrôlée correspond à l'ensemble des procédés de conversion chimique de l'énergie (moteurs terrestres, aériens et spatiaux, production industrielle : chaudières, turbines à gaz, incinérateurs, fours industriels, traitement thermique des matériaux). Ces procédés tiennent un rôle central dans la production d'énergie puisqu'ils représentent actuellement 50 % de la consommation d'énergie primaire en France et plus de 80 % dans le monde. Outre les ressources fossiles, dont les stocks limités conduisent à développer de nouveaux procédés utilisant des combustibles alternatifs et/ou renouvelables, des additifs biosourcés ou de nouveaux vecteurs énergétiques sont considérés. L'objectif général est la recherche de modes de production d'énergie propres, sûrs et efficaces minimisant la consommation, les émissions et les risques. Ceci passe par une meilleure connaissance intrinsèque des phénomènes en vue de simulations prédictives.

La combustion incontrôlée (incendies ou explosions) est également une thématique de

recherche importante, car elle représente un danger majeur (risques industriels, explosions chimiques, feux de forêt) et une source de pollution atmosphérique qu'il est nécessaire d'anticiper par la mise en place de moyens de prévention, d'analyse de risques et de lutte. Les conséquences de la combustion en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et de polluants sont aussi des objets majeurs d'étude en vue de comprendre la formation et le devenir des polluants pour le maintien de la qualité de l'air.

A. Positionnement international, structuration

La communauté scientifique est représentée nationalement par 17 laboratoires soit environ 150 chercheurs et enseignants-chercheurs, et est également présente dans d'autres organismes publics et privés (ONERA, IFPEN, CER-FACS). Elle est structurée au travers du Groupement Français de Combustion, le GFC, qui est une section du Combustion Institute, la Fondation de Recherche Internationale sur les Flammes (FRIF), des Groupements de Recherche (GdR Feux et Suie), des réseaux nationaux, européens ou internationaux (e.g. International Energy Agency, IEA). Sur la base des publications, au cours des cinq dernières années dans les journaux majeurs, la combustion française se situe au 2^e rang européen après l'Allemagne et au 5^e rang mondial après les États-Unis, la Chine et la Russie.

B. Analyse des thématiques, développements récents et enjeux

Les problématiques de la communauté « Combustion et systèmes réactifs » concernent la chimie de la combustion, et en particulier la caractérisation des cinétiques de mélanges

combustibles et des diagnostics associés, la formation et la réduction des polluants comme les suies, les HAP, les NOx, les SOx, les hydrocarbures imbrûlés et les GES. La caractérisation de la dynamique des flammes laminaires et turbulentes reste également une thématique importante, tout comme l'expérimentation et la simulation numérique des systèmes de combustion, la sécurité des systèmes industriels (vecteurs d'énergie, explosions chimiques, incendies, nucléaire), la propagation des feux, ou la pollution atmosphérique (étude du devenir des polluants via des campagnes de mesures en laboratoire et sur le terrain). Ces nombreux domaines ont un fort impact sociétal et couvrent de larges gammes de conditions opératoires (basse à haute pression, basse à haute température, large gamme de concentrations) et d'échelles spatio-temporelles.

Les thématiques qui émergent au niveau national et international se regroupent en trois axes majeurs. Le premier concerne la compréhension de la cinétique chimique et la mise en œuvre des diagnostics associés. Le second porte sur la caractérisation de la dynamique de combustion et le dernier sur les aspects théoriques, la modélisation et la simulation numérique. Ces axes peuvent être illustrés, de façon non exhaustive, par quelques exemples.

S'agissant de la compréhension de la cinétique chimique, l'objectif commun des études est de comprendre les mécanismes réactionnels mis en jeu dans des systèmes variés et complexes, comme, par exemple, les systèmes chimiques autres que CHONS résultant de l'étude de nouveaux vecteurs de stockage d'énergie, de valorisation du CO₂ ou de nouveaux combustibles (H₂, NH₃, CH₃OH, XTL, biomasse). Pour ce faire, des études expérimentales (diagnostics avancés et nouvelles techniques analytiques) et théoriques (calculs *ab initio*) se développent en vue de quantifier des espèces clés (intermédiaires, micropolluants) et de déterminer les cinétiques associées. La compréhension des mécanismes réactionnels en phase liquide (combustion supercritique) et le développement de la chimie hétérogène (catalyse, chemical loo-

ping) représentent aussi de nouveaux champs d'investigation.

Dans la perspective, à terme, de mesurer des champs instantanés 3D résolus en temps, la caractérisation de la dynamique dans des systèmes de combustion canoniques ou réels s'avère fondamentale. Cela passe par le développement d'expériences multi-physiques instrumentées pour déterminer la topologie des flammes, les conditions de stabilité et les émissions en fonction du combustible, en incluant des études portant sur la combustion en écoulements rapides ou détonants. La maîtrise des systèmes implique de contrôler les instabilités et les paramètres de mitigation de la combustion (inhibiteurs de flamme, diminution des intensités des ondes de choc), mais aussi de connaître le comportement aux feux de nouveaux matériaux. Afin de s'approcher de plus en plus de la réalité des systèmes et des grandes géométries, des avancées théoriques couplant modélisation et simulation numérique sont encore nécessaires. Les enjeux portent sur la prise en compte des différentes échelles et des différents régimes tout en incluant une chimie de plus en plus détaillée. Les techniques d'intelligence artificielle pour la modélisation, l'analyse des simulations et des données expérimentales, et même le pilotage des simulations en temps réel représentent des outils méthodologiques à développer.

C. Analyse des forces et faiblesses, recommandations

La communauté «Combustion et Systèmes Réactifs» est par nature pluridisciplinaire, car elle résulte du couplage entre la cinétique chimique, la thermodynamique, la mécanique des fluides, et les transferts thermiques. Elle est ainsi naturellement en interaction avec les autres communautés de la section 10, et aussi à l'interface avec d'autres disciplines : les mathématiques appliquées et l'informatique pour l'implantation des méthodes numériques, le développement du Calcul Haute Perfor-

mance ou la génération d'algorithmes spécifiques, les sciences de la Terre, de l'Univers et la Climatologie pour le couplage combustion/captage du CO₂, le lien avec la haute atmosphère terrestre ou l'atmosphère d'exoplanètes, les matériaux pour l'aspect tenue thermique et vieillissement, la biologie pour l'aspect toxicité des émissions, les Sciences Humaines et Sociales pour l'acceptabilité des solutions pour la transition énergétique ou la modélisation des comportements en cas d'incendies.

Les défis scientifiques de la thématique ne pourront être relevés que si les approches multi-physiques et multi-échelles (en collaboration avec les autres organismes notamment pour les essais à grande échelle) sont intensifiées : d'un point de vue expérimental, par des diagnostics avancés combinés dans des installations de plus en plus représentatives des conditions réelles d'application et d'un point de vue de la simulation, par l'accroissement de la diversité des phénomènes physiques (prise en compte dans les simulations du transfert thermique aux parois et de leur tenue, du rayonnement, de la formation des particules, etc.). Enfin, il apparaît primordial d'associer les travaux en combustion à ceux des communautés travaillant à la production de nouveaux combustibles ou aux traitements des émissions (génie des procédés, catalyse, plasma hors équilibre, matériaux).

La communauté « Combustion et Systèmes Réactifs » est au cœur de la transition vers un système énergétique plus durable, ce qui l'amène à réorienter ses activités de l'optimisation des rendements de combustion de systèmes dont l'acceptabilité sociale décroît, vers la combustion de la biomasse, les nouveaux vecteurs énergétiques, les risques industriels ou naturels. À l'avenir, la conversion chimique du combustible en énergie sera basée sur l'optimisation globale des nouveaux modes de combustion (combustion sans flamme, nouveaux cycles thermodynamiques, moteurs hybrides, etc.). L'utilisation de nouvelles sources énergétiques pour pallier l'épuisement des ressources fossiles (utilisation de combus-

tibles solides de récupération) et pour rentabiliser le surplus d'énergie renouvelable (e-fuel) conduira à reconsidérer des concepts déjà connus et nécessitant encore des études fondamentales théoriques et expérimentales. La compréhension et la prise en compte des effets de ces systèmes réactifs sur le vivant, l'environnement et le climat seront également considérées de manière de plus en plus systématique.

V. Génie des Procédés

Les recherches conduites par la communauté du Génie des Procédés (« Chemical Engineering ») visent l'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques permettant de décrire les transformations de la matière et de l'énergie, pour concevoir et optimiser des procédés industriels durables, en intégrant l'ensemble des phénomènes et des processus multi-échelles et multi-physiques, et leurs couplages. Une caractéristique forte du Génie des Procédés est qu'il s'intéresse à des objets réels, donc complexes. Cette complexité peut être liée à la distribution des phases du système (multiphasique ou multi-structuré), à l'évolution temporelle (milieux réactifs, transferts de chaleur et de masse), à des lois de comportement (rhéologiques, chimiques, biologiques, processus couplés présentant des effets dynamiques très divers).

A. Positionnement international, structuration

La recherche en Génie des Procédés est conduite par une communauté dynamique organisée au CNRS au sein d'une quinzaine d'UMR, 4 UMS, 10 GDR et 11 Fédérations relevant de la section 10 (entièrement ou en

partie). Elle est également largement présente dans les universités ou écoles d'ingénieurs (600 ingénieurs en Génie des Procédés diplômés par an) et au sein d'autres établissements comme l'INRA, l'IFSTTAR, l'IRSTEA, le CIRAD, l'INERIS, l'INRS, l'IFPEN ou le CEA. Environ cinquante chercheurs de la section 10 du CoNRS relèvent du Génie des Procédés, mais au total, pour l'ensemble des établissements 1 800 enseignants-chercheurs/chercheurs et 1 800 doctorants/post-doctorants positionnent leurs activités en Génie des Procédés (source : livre blanc SFGP 2018). La Société Française de Génie des Procédés (SFGP) qui regroupe les personnes qui exercent une activité professionnelle dans le domaine du Génie des Procédés compte environ 500 adhérents. Elle est membre de l'European Federation of Chemical Engineering (EFCE), dans laquelle la communauté française est très active. Par exemple, elle anime 4 des 20 Working Party.

Sur la base du nombre de publications au cours des 5 dernières années (source Web of Science), le Génie des Procédés français se situe au 3^e rang européen (après l'Allemagne et le Royaume-Uni), et au 7^e rang mondial. Les articles sont publiés en grande partie dans les journaux historiques du domaine du Génie des Procédés (50%), mais couvrent également de façon importante des journaux relevant des domaines de la chimie, de l'ingénierie, des sciences des matériaux, des sciences biologiques et de l'environnement.

B. Le Génie des Procédés au cœur des enjeux sociétaux

Le Génie des Procédés revendique un positionnement fort sur les enjeux sociétaux à travers des contributions axées sur l'industrie du futur, l'écologie industrielle, les bioprocédés et la valorisation des bioressources, la transition énergétique, la santé, l'alimentation, l'eau, la transition environnementale et l'économie durable. Le Génie des Procédés est présent dans 15 pôles de compétitivité.

1. L'industrie du futur et l'écologie industrielle

Les recherches en Génie des Procédés contribuent à l'élaboration d'un nouveau modèle d'usine moderne, connectée et modulaire qui répond à la fois aux enjeux économiques et sociétaux. Les recherches portent en particulier sur l'intensification des procédés, sur l'optimisation et l'aide à la décision multicritère, et sur l'écologie industrielle dans un contexte de développement durable. Des procédés compacts, flexibles, robustes et modulaires (intégrant la variabilité de la ressource dans le temps et dans l'espace, ainsi que différentes filières) permettent de minimiser l'utilisation des ressources non renouvelables (énergie, ressources fossiles et minérales). Par ailleurs, l'intégration des technologies numériques (réalité augmentée, nouvelles technologies manufacturières, internet des objets, simulation) aux procédés, renforcera l'opérabilité des environnements multiples notamment via des capteurs intelligents et permettra de revisiter les concepts et les technologies du Génie des Procédés, tout en permettant de gagner du temps et de la fiabilité dans les phases de conception.

2. Les bioprocédés et la valorisation des bioressources

Le développement de nouveaux matériaux et la production d'énergie durable, à partir de bioressources (agroressources, biomasse lignocellulosique, bioressources marines, déchets) sont des axes en fort développement dans la communauté du Génie des Procédés. La viabilité économique de ces filières requiert des approches de bioraffinerie pour la valorisation de tous les constituants des bioressources, ce qui nécessite le développement de procédés efficaces et durables de transformation, d'extraction et de purification. De nouveaux procédés sont étudiés : pour la valorisation de la biomasse ligno-cellulosique et d'autres biopolymères issus de sous-produits de l'agri-

culture, pour la production d'énergie (bio-éthanol de seconde génération) ou de compost, ou encore celle de composés à haute valeur ajoutée (cosmétiques, composés pharmaceutiques). Le génie des bioproduits (aliments, biomédicaments, matériaux biosourcés, biomatériaux) a été introduit, avec pour objets la conception du procédé en fonction des propriétés d'usage visées pour le produit fini (quality-by-design), et la transition alimentaire. En ingénierie pour la santé, la thérapie cellulaire et l'ingénierie tissulaire offrent de réelles promesses, mais nécessitent, pour répondre aux besoins croissants de cellules souches ou différenciées, la mise en œuvre de procédés intensifiés de culture de ces cellules.

3. La transition environnementale et énergétique et l'économie durable

Les recherches sur des systèmes de production durables, à faible consommation de matière ou d'énergie, de meilleure efficacité énergétique, intégrant des circuits de recyclage des produits, les énergies renouvelables ou générant moins de déchets, tout en agissant sur les propriétés ou la mise en forme de ces produits, sont en plein essor. On parle alors de génie de la réaction en solvants verts, d'écoconception et d'ingénierie verte (intégrant parfois une démarche de biomimétisme et bioinspiration, d'analyse du cycle de vie couplée à la simulation des procédés, d'empreinte environnementale, et d'ingénierie inverse) ou d'écotechnologies (traitement de l'air et de l'eau, des effluents, des sols, des déchets). Des résultats ont déjà été obtenus pour la production et la valorisation de vecteurs énergétiques (biocarburants, biogaz, hydrogène, biopiles), sur des technologies de conversion et de stockage/déstockage de l'énergie (procédés de conversion, matériaux pour l'énergie), ou sur l'optimisation énergétique des procédés et des systèmes (procédés sobres, mix énergétiques).

C. Thèmes émergents et en évolution

1. Mine urbaine : Gestion Intégrée des Ressources Primaires et Secondaires

L'économie circulaire consistant notamment à récupérer les matières premières valorisables contenues dans les matériaux usagés (aimants d'éoliennes, batteries, panneaux solaires) ou issues de friches industrielles, contribuera de plus en plus à rendre autonome la France et à sécuriser son approvisionnement en métaux stratégiques (cobalt, nickel, terres rares, palladium, platine, niobium, tantale). Le développement de technologies innovantes, capables de répondre aux défis actuels, nécessite le regroupement de compétences transversales en géologie, minéralurgie, chimie et ingénierie. Les études portent sur la caractérisation fine des matières premières (matériaux usagés), les modèles thermodynamiques permettant de décrire le comportement des matériaux lors des procédés de lixiviation ou de précipitation et les mécanismes de sélectivité dans la séparation des composants d'intérêt.

2. Ingénierie de la matière molle

Dans les procédés de transformation, certains fluides et matériaux (polymères, gels, dispersions) voient leur structure altérée par les contraintes (mécaniques, thermiques, etc.) de l'ordre de grandeur des fluctuations thermiques. L'auto-structuration de cette matière molle à l'échelle mésoscopique détermine alors le comportement macroscopique de ces systèmes. Ce thème était généralement traité par les laboratoires de chimie ou de physique, mais désormais le couplage de ces comportements avec les conditions de mise en œuvre dans les procédés et l'interaction procédé-produit est clairement affiché par les laboratoires de Génie des Procédés. Il s'agit d'élaborer et de mettre en forme des matériaux divisés tels que les nanomatériaux hybrides, et de précipiter ou de cristalliser des nanostruc-

tures organisées, en contrôlant les arrangements et les interactions entre particules via les paramètres du procédé, afin de conférer de nouvelles propriétés d'usage aux matériaux obtenus.

3. Transition vers une bioéconomie

La conversion durable de biomasses renouvelables en produits industriels constitue une alternative à l'économie linéaire actuelle, basée sur la mobilisation des ressources fossiles. Une réflexion intégrant toutes les composantes de la chaîne de valeur, des ressources aux produits, avec leurs impacts environnementaux, économiques, sociétaux et éthiques, nécessite des approches de recherche systémiques et interdisciplinaires dans lesquelles le Génie des Procédés a toute sa place.

La valorisation des agroressources et de tous les co-produits et déchets obtenus lors de la transformation de ces matières premières va continuer à mobiliser des chercheurs du Génie des Procédés pour l'élaboration de nouveaux procédés efficaces, économes en énergie permettant de réduire les impacts environnementaux des produits et des filières industrielles : il s'agira d'inventer des voies de transformation pour une valorisation « zéro déchet ». Dans cette optique, la biotransformation des résidus ultimes doit être envisagée, pour générer, par exemple, des vecteurs énergétiques (méthanisation, production d'hydrogène, etc.). Cette transition passe par de fortes interactions entre sciences économiques, sociales et sciences de l'ingénieur.

4. Bioprocédés pour la santé

L'industrialisation de la culture des cellules souches pour répondre aux besoins en médecine régénérative passe par une compréhension approfondie des relations entre les paramètres opératoires et les réponses cellulaires pour permettre une extrapolation réussie à l'échelle du bioréacteur. Cette phase est cruciale pour obtenir des cellules en quantité non

limitée, dans des conditions standardisées, reproductibles, et validées sur le plan de la sécurité et de l'efficacité. On assiste actuellement au développement de technologies en rupture par rapport aux procédés biopharmaceutiques classiques, intégrant de nouveaux outils de contrôle en-ligne, qui ouvriront des possibilités de traitements médicaux entièrement nouvelles.

D. Analyse des forces et faiblesses, recommandations

La communauté du Génie des Procédés est bien structurée en France et interagit fortement dans le cadre de journées, de congrès spécifiques ou à travers la société savante SFGP. De par la nature transversale et pluridisciplinaire de ses activités, le Génie des Procédés a des interactions fortes au sein même de la section 10 et avec les autres instituts. Les recherches traitant de plus en plus de milieux hétérogènes hors équilibre sur des échelles ultimes de temps (ultra-rapide) et de dimension, elles s'enrichissent des avancées récentes en chimie théorique, en biologie fondamentale, en mécanique des fluides numérique, en mathématiques appliquées, mais aussi en méthodes d'analyse et d'instrumentation *in-situ* et en ligne. Il est également à noter que les chercheurs en Génie des Procédés participent activement au développement de nouvelles voies de synthèse (chimie verte, catalyse, flow chemistry, ingénierie enzymatique et microbienne, techniques d'activation telles que la lumière, les micro-ondes ou les ultrasons) et des procédés associés, en interagissant fortement avec la communauté des chimistes et des physiciens. L'interface avec la communauté matériaux est aussi très large à travers les procédés d'élaboration et la problématique des interactions entre surface et milieux réactifs. L'exploitation rationnelle des procédés, basée sur des modèles dynamiques et la mise en œuvre de capteurs conduit à la collaboration avec les spécialistes d'automatique. Les spécificités des bioprocédés impliquent également

de fortes interactions avec les (micro)biologistes pour l'intégration des données omiques et génétiques dans l'optimisation et le contrôle des bioréacteurs, mais aussi pour explorer le monde du vivant et s'en inspirer.

L'analyse de la structuration française des activités du Génie des Procédés montre que les différents outils du CNRS (GdR, Fédération) pourraient être davantage utilisés pour accompagner et favoriser le développement et la pérennité des nouvelles thématiques identifiées. Au niveau international, des partenariats structurés sont à renforcer, sur des thématiques existantes ou émergentes, au travers de la mise en place d'IRP, d'IRN ou IRL.

Par ailleurs, bien que le Génie des Procédés se définisse par rapport à des finalités applicatives, il est surprenant de constater que cette discipline est peu connue du grand public. Sans doute des efforts de vulgarisation sont-ils à faire pour augmenter la visibilité des recherches en Génie des Procédés.

En conclusion, il apparaît que le Génie des Procédés est bien positionné pour traiter des grands enjeux sociétaux actuels comme l'énergie, l'environnement et la santé. Il a une longue tradition de partenariat avec l'industrie et le monde économique et contribue à l'avancée générale des sciences de l'ingénieur qui requièrent le développement d'approches conceptuelles pour relever les défis que posent les objets et les systèmes complexes.

Conclusion

La diversité scientifique au sein de la section 10 est unique ; à titre d'exemple, les disciplines qui la constituent se répartissent dans 7 sections du CNU. Elle réunit ainsi des chercheurs qui traitent toutes les facettes des questionnements fondamentaux comme des problématiques appliquées, en lien avec le transport, les transferts et les procédés de transformations des milieux fluides réactifs : méca-

nique des fluides, thermique et énergétique, plasmas et laser, combustion, génie des procédés. Cette structuration originale favorise les approches intégratives et la diffusion des méthodologies entre les disciplines. Ceci est tout particulièrement vrai pour les outils et concepts développés par les mécaniciens des fluides et les thermiciens, comme en témoigne leur implication quasi systématique dans les GDR. Si les approches scientifiques peuvent différer d'une discipline à l'autre, elles ont en commun le caractère multiéchelle et multiphysique et la synergie entre études fondamentales et intégratives qui assurent une réponse de qualité aux défis sociétaux et économiques.

La diversité des composantes de la section 10 a une autre conséquence : les différences de modes de fonctionnement et de culture des communautés qu'elle réunit conduisent de facto à considérer des profils de chercheur.e.s très variés. Cette attitude est par exemple favorable à la promotion des femmes comme en atteste le pourcentage de femmes qui est de 22 % pour les chargés.e.s de recherche et de près de 25 % pour les direct.eurs.trices de recherche. Néanmoins, ces dernières années, le pourcentage de candidates au concours d'entrée est devenu inférieur aux pourcentages de femmes dans la section et le nombre de femmes qui partent à la retraite est supérieur au nombre de recrutées. Ce dernier point est aussi en lien avec l'augmentation de l'âge moyen des chercheurs : 2 ans entre 2016 et 2019. Aujourd'hui le nombre de chercheur.e.s de 60 ans et plus est plus élevé que le nombre de chercheur.e.s de moins de 40 ans. La lente érosion des candidatures féminines déjà observée au cours de la mandature précédente s'est brusquement accentuée en 2018, de façon concomitante à la réduction du nombre de postes créés.

Les évaluations de la section n'ont pas mis en évidence de relation entre la taille des laboratoires et la qualité de la production scientifique associée. Par contre, lorsqu'au cours du processus de restructuration le cadre évolue à tel point que l'ensemble du projet doit être reconsidéré, la démotivation des chercheurs

prend clairement le pas sur les bénéfiques potentiels.

La dynamique des milieux fluides est source de phénomènes et d'images d'une grande esthétique visuelle, qui offrent un point d'entrée original et pédagogique vers les Sciences. Les recherches menées par les laboratoires de la section 10 sont ainsi particulièrement propices à la vulgarisation et à la diffusion vers le grand public, condition indispensable pour renouveler les vocations et maintenir un lien fort entre Science et Société.

Les développements méthodologiques récents s'appuient fortement sur le calcul intensif et les avancées métrologiques pour acquérir des données résolues finement en espace et en temps. Des techniques spécifiques ont été et continueront d'être adaptées et mises en œuvre pour traiter ces données massives. La poursuite de cette dynamique, très positive, requiert de disposer d'équipements mi-lourds qui restent aujourd'hui difficiles à financer. La mise en place par le CNRS de programmes de soutien de ce type d'achat est vivement souhaitable. Ces programmes devraient induire un effet de levier des collectivités territoriales et des agences de moyens. Le coût croissant de ces équipements impliquera des choix stratégiques sur leur implantation au niveau national, et la coordination avec les investissements régionaux en accord avec la dynamique actuelle du CNRS. Des personnels techniques hautement qualifiés et les moyens de maintenance de ces équipements seront aussi indispensables à l'optimisation de leur utilisation.

Par contraste, la situation est moins critique en ce qui concerne la simulation numérique, en raison de l'existence de centres de calcul nationaux, sur lesquels seules la qualité du projet et les performances computationnelles des codes de simulation gouvernent la mise à disposition d'heures de calcul. C'est un point à souligner, d'autant plus que les communautés de la mécanique des fluides, de la combustion et des sciences du climat consomment plus de la moitié des ressources en temps de calcul gérées sous l'égide de GENCI.

Les thématiques de recherche qui étaient centrées sur les fluides complexes évoluent vers les fluides actifs avec une prise en compte des interfaces sans cesse plus grande. Si les applications en biologie et médecine se sont considérablement développées, toutes disciplines confondues, le biomimétisme, les procédés sobres, la valorisation du CO₂ et de la biomasse, les matériaux multifonctionnels aux propriétés optimisées, les énergies renouvelables, la dynamique des océans, et la prédiction de la météo sont au cœur de plus en plus de projets qui participeront à répondre aux défis de la transition énergétique, du changement climatique, de la santé et de l'environnement.

Soulignons également que l'enjeu des recherches sur les milieux fluides et réactifs va au-delà de leurs applications dans de très nombreux secteurs de la vie quotidienne. Les nouveaux développements méthodologiques permettent d'associer approches pointue et intégrative, de décliner les situations réelles en problématiques scientifiques, d'aborder des systèmes complexes couplés présentant de fortes raideurs, de conceptualiser de l'échelle atomique à l'échelle macroscopique. Ainsi, les chercheurs de la section 10 couvrent une large gamme de TRL. Ils bénéficient de plateformes indispensables aux études de situations réelles et participeront à 7 des ODD à Horizon 2030 : bonne santé et bien-être, eau propre et assainissement, énergie propre et d'un coût abordable, industrie innovation et infrastructure, ville et communauté durables, consommation et production responsables, mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques.

Cette aptitude à répondre à des enjeux sociétaux ou économiques est une force. Pour qu'elle le reste sur le long terme, alors que la réponse à des appels à projets successifs conduit à sans cesse débiter de nouveaux axes de recherche, les chercheurs doivent aussi pouvoir mener des projets indépendants de toute finalité, condition indispensable pour consolider leur socle de connaissances scientifiques. Ceci est tout particulièrement vrai pour les jeunes chercheurs. Les sociétés savantes,

GDR, et congrès nationaux qui favorisent les échanges scientifiques sont tout autant indispensables pour établir des collaborations saines et permettre le développement et l'épanouissement de la personnalité scientifique du chercheur.

Réduire la complexité du paysage de la recherche, la diversité et la redondance des appels à projets et des structures entre les niveaux locaux, régionaux, nationaux et européens est fondamental pour redonner au chercheur le temps de chercher. Limiter le report des tâches administratives sur les chercheurs, leur complexification, les zones ZRR et les difficultés de recrutement associées sont aussi des moyens pour garantir la qualité des avancées scientifiques. De façon générale, réduire l'ina-

déquateur entre la réalité de la recherche et celle de la vie dans les laboratoires est indispensable au maintien de l'enthousiasme des chercheurs et donc de leur créativité.

En conclusion, il est important de donner aux chercheurs les moyens de construire leur projet de recherche à une échelle de temps de 10 ans afin qu'ils s'appuient sur un socle scientifique solide, partagent les méthodologies et se positionnent avec force au cœur de l'ingénierie, en liens forts avec les défis sociétaux et le monde socio-économique. C'est ainsi que la qualité et l'originalité des travaux de la section 10 continueront à être au meilleur niveau international, comme en témoigne sa forte présence dans toutes les structures internationales.

SECTION 11

SYSTÈMES ET MATÉRIAUX SUPRA ET MACROMOLÉCULAIRES : ÉLABORATION, PROPRIÉTÉS, FONCTIONS

Composition de la section

Véronique SCHMITT (présidente de section), Elise DENIAU (secrétaire scientifique), Christophe BOISSON, Fouzia BOULMEDAIS-TOUNSI, Laurent CHAZEAU, Fabrice COUSIN, Guylaine DUCOURET, Alain DURAND, Eliane ESPUCHE, Guillaume FLEITH, Simon HARRISSON, Pascal HEBRAUD, Emmanuèle HELFER-COZIC, Laurent HEUX, Daniela LEGROS, Anthony MAGGS, Pascal MARTIN, Hélène MONTES, Alain RIVET, Daniel TATON, Guillaume TRESSET.

Résumé

La section 11 rassemble une large communauté de chimistes des polymères, de physico-chimistes, de spécialistes des matériaux et de physiciens de la matière molle et des systèmes biologiques, ayant comme approche commune de comprendre, concevoir et développer des assemblages multi-échelles aux propriétés et fonctions originales à partir de la connaissance des interactions entre briques élémentaires (macromolécules, colloïdes, cellules...). La section 11 correspond à une communauté pluridisciplinaire par essence qui oeuvre au développement et à la compréhension de systèmes ou matériaux communs, ce qui confère une grande cohérence et complémentarité à ses acteurs. Pour construire les

assemblages, la connaissance des interactions et de la dynamique des systèmes étudiés est de toute première importance. Certains de ces systèmes présentent de fortes hétérogénéités spatiales ou temporelles, et les échelles de temps et de longueur qui les caractérisent sont très variables ce qui implique le développement de dispositifs expérimentaux adaptés. Depuis sa création, les activités de la section sont également positionnées à l'interface des sciences fondamentales et appliquées. En conséquence, il existe de fortes interactions avec le monde industriel. Le présent rapport comporte cinq parties consacrées aux grandes thématiques de la section et deux plus transverses dédiées aux approches théoriques et numériques et aux grands instruments. La première partie aborde les avancées et les pers-

pectives de la « chimie macromoléculaire ». Les principales évolutions concernent l'accroissement du contrôle des architectures, des réactions et l'extension à des monomères dits difficiles, grâce au développement de nouvelles méthodes de synthèse et de procédés de polymérisation. Le respect de l'environnement et plus généralement tout le cycle de vie y est une préoccupation centrale et une source de renouveau. La « physico-chimie de la matière molle », qui fait l'objet de la deuxième partie, est l'étude de l'assemblage de briques élémentaires, identiques ou différentes. Les systèmes étudiés se complexifient avec la recherche d'un plus grand contrôle de leur (auto-)assemblage. Ainsi, il est essentiel de comprendre l'aspect dynamique de ces systèmes afin de contrôler les réponses à différents stimuli. Une des voies émergentes est de guider l'auto-assemblage des briques élémentaires. Les états métastables, si les chemins de formulation sont bien maîtrisés, sont également à l'origine de nouvelles formes d'organisation de la matière. La troisième partie concerne les « matériaux » et leur grande diversité de structure, de propriétés et d'usage. Elle est organisée autour des enjeux sociétaux. La structuration des matériaux à partir de briques issues du pétrole ou bio-sourcées, qui peuvent avoir des spécificités très différentes, a considérablement évolué et a bénéficié de techniques nouvelles de structuration à différentes échelles se nourrissant des progrès de la chimie macromoléculaire et supramoléculaire et de la physique de la matière molle. Dans tous les cas, le lien entre la brique élémentaire, le procédé d'élaboration, l'architecture complexe des matériaux obtenus et les propriétés visées restent des problématiques fondamentales de la section. La question de la recyclabilité de tous les matériaux se pose avec une importance grandissante et des solutions variées ciblant la brique ou l'assemblage sont étudiées. La quatrième partie est dédiée à la « physique de la matière molle » qui se focalise sur la structure et la dynamique des assemblages ainsi que sur leur réponse à des champs extérieurs. Il s'agit, par exemple, de décrire les comportements de fluides complexes lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations mécaniques extérieures faibles ou

fortes ou de déterminer le comportement de ces systèmes lors de processus variés, souvent d'importance industrielle, tels que le mouillage, l'écoulement en milieu confiné ou le séchage. La spécificité des approches développées réside dans le souci de prendre en compte précisément les caractéristiques physico-chimiques des systèmes étudiés plutôt que de rechercher des classes d'universalité. La cinquième partie résume les fortes évolutions de l'« interface physique – biologie ». Les systèmes reconstitués ou biomimétiques ont considérablement progressé pour mieux tenir compte de la complexité des systèmes biologiques en associant membranes lipidiques, biopolymères du cytosquelette, moteurs moléculaires et diverses protéines pour mieux mimer les architectures cellulaires et leur activité (formation, rupture...). À moyen terme, il devient envisageable d'élaborer des proto-cellules échangeant de la matière et de l'énergie avec l'environnement. L'étude des propriétés mécaniques hors équilibre et de la mécanosensibilité de ces assemblages reconstitués et de systèmes vivants s'est développée en collaboration de plus en plus étroite et réciproque avec les biologistes. Ces systèmes servent également d'inspiration pour développer une physique de la « matière active », un champ en plein essor. Cette complexité croissante dans tous les champs thématiques de la section se retrouve évidemment dans le développement de « la théorie et la simulation pour la matière molle » abordée dans la première partie transverse. En effet, la théorie et les simulations numériques tiennent compte à la fois de la complexité structurale, morphologique et de la dynamique des systèmes en incluant des échanges d'énergie qu'il s'agisse de systèmes polymères ou biologiques. Ces développements théoriques se font en forte interaction avec les expérimentateurs et avec les concepteurs de matériaux. En plus de ces méthodes théoriques et numériques, il incombera aux théoriciens, bien au-delà du périmètre de la section, de développer et de faire connaître des méthodes transverses comme le « *machine learning* » ou de gestion du nombre croissant de données expérimentales et de traitement d'images ou « *big data* ». La seconde partie

transverse fait le point sur l'état actuel des très grandes infrastructures de recherche liées à la diffusion du rayonnement (principalement les synchrotrons et les centres de diffusion neutronique) en relevant les points d'inquiétude et les améliorations à venir. Pour finir, dans ce contexte de forte dynamique scientifique et de grande compétition internationale, la section réaffirme ses inquiétudes quant à la diminution du nombre de postes de chercheurs permanents.

Introduction

La section 11 du comité national est dédiée à la conception, l'élaboration et l'étude de systèmes et de matériaux à partir de briques élémentaires issues de la matière molle. La section est pluridisciplinaire par ses façons d'aborder, de créer et de caractériser ces systèmes. En effet, les regards des physiciens, des chimistes, des physico-chimistes et des biologistes sont complémentaires et s'enrichissent mutuellement. De même, le travail expérimental ainsi que le développement de la théorie et de la simulation ne peuvent être dissociés et contribuent de façon constructive au déploiement des thèmes de la section. La section se positionne également à l'interface entre ce qui est communément appelé la science fondamentale et la science appliquée. Celles-ci sont si intimement imbriquées au sein de la section qu'elles deviennent indiscernables, les applications alimentant l'émergence de questions fondamentales et les résultats fondamentaux venant soutenir des applications. En contrepartie de ces points extrêmement positifs, cette pluridisciplinarité apporte également des difficultés. En effet comment maintenir les équilibres et la diversité des thèmes de la section lorsqu'une discipline prend de l'ampleur? Comment rester compétents pour évaluer les travaux lorsque les interfaces s'éloignent du cœur de la section? Comment rester compétitifs dans l'attractivité vis-à-vis des jeunes chercheurs lorsque le secteur privé, très dyna-

mique, recrute parmi le même vivier? Faire vivre une section, c'est accompagner la grande créativité scientifique provenant des chercheurs qui lui sont rattachés, les encourager et les soutenir tout en restant vigilants aux difficultés que des chercheurs peuvent rencontrer tout au long de leur carrière. Le rôle de la section est donc tout à fait enthousiasmant mais il devient également très difficile en cette période de forte diminution de postes de chercheurs permanents. La section 11 est donc particulièrement inquiète quant à sa capacité à maintenir, à l'avenir, l'équilibre des thématiques en son sein.

Environ 280 chercheurs permanents dont 30 % de femmes sont affectés à la section 11⁽¹⁾ qui est pilotée de façon principale par l'Institut de Chimie et de façon secondaire par l'Institut de Physique. Ces chercheurs permanents entourés des autres catégories de personnel à la fois au CNRS et dans les autres organismes de recherche sont à l'origine d'une science dynamique et de très grande qualité. Le but de ce rapport de conjoncture n'est pas d'établir une liste exhaustive des travaux de recherche de l'ensemble de la communauté mais plutôt de partager, à un instant donné, les points de vue des membres de la section sur les évolutions des thématiques scientifiques correspondant à son périmètre et de mettre l'accent sur des points remarquables ou des difficultés présentes ou prévisibles.

Ce rapport devant s'adresser à la fois à la communauté scientifique de la section, aux directions des instituts de rattachement de la section et à la direction générale du CNRS, la rédaction d'un texte unique n'est pas aisée. Les membres de la section ont fait de leur mieux afin de relever le défi de répondre aux attentes des divers lecteurs.

Le rapport est divisé en cinq parties thématiques reprenant les principales sous-disciplines de la section que sont la chimie macromoléculaire, la physico-chimie de la matière molle, les matériaux, la physique de la matière molle et l'interface physique-biologie. À cela s'ajoutent deux parties transverses, dédiées l'une à la théorie et aux simulations numériques pour la matière molle et l'autre

aux très grands instruments et plus spécifiquement à la diffusion de rayonnement très utile à la communauté de la matière molle.

I. Chimie macromoléculaire

La chimie macromoléculaire est une discipline phare de la section 11. Plus d'une vingtaine d'unités de recherche consacrant une partie de leurs activités à la chimie macromoléculaire sont rattachées à la section 11. Les années 1990 et 2000 ont connu des avancées majeures, notamment avec le développement des méthodes de polymérisation radicalaire contrôlée. Ces développements ont créé un mouvement de dynamisme dans tous les domaines de la chimie macromoléculaire. D'un point de vue fondamental, la chimie macromoléculaire s'est revitalisée en innovant en termes de méthodologies et de procédés de synthèse des polymères. La synthèse de copolymères de structures diverses et variées, *via* des réactions de copolymérisation relève aussi pleinement du domaine de la chimie macromoléculaire, ce qui permet de moduler à l'infini les propriétés physico-chimiques et thermomécaniques des matériaux polymères. Certaines innovations se sont inspirées de concepts d'autres disciplines de la chimie, comme la biochimie, les catalyses organométallique et organique ou encore la chimie supramoléculaire. Plusieurs lignes de forces ont émergé au cours de la dernière décennie en chimie des polymères, celles-ci sont discutées ci-après.

A. Contrôle des polymérisations, des séquences et de la structure des polymères

Les chimistes des polymères savent bien maîtriser la sélectivité des espèces réactives

pour induire des processus de polymérisation « vivante/contrôlée » et ainsi produire des polymères de structure bien définie. La contribution des polyméristes français à ce domaine a été très significative, notamment en polymérisation radicalaire contrôlée (PRC), ces efforts de recherche ayant été fortement soutenus par l'industrie chimique. Les méthodes de PRC, arrivées à une période de maturité, sont aujourd'hui totalement intégrées dans la « boîte à outils » des polyméristes à des fins d'ingénierie macromoléculaire, à travers la synthèse d'une variété d'architectures « sur mesure » presque infinie (copolymères à blocs, brosses polymères, etc.).

La PRC s'avère également pratique pour introduire des unités stimulables (sensibles à des variations de pH, de température ou photosensibles) dans les chaînes de (co)polymères.

Les équipes françaises ont été pionnières dans le domaine de la PRC en milieux dispersants (voir paragraphe B). Un des verrous de la PRC, à savoir l'obtention de polymères de très fortes masses molaires, a aussi été levé *via* le développement de procédés spécifiques. Des avancées importantes concernant le contrôle de monomères réputés « difficiles », tels que les monomères vinyliques fluorés ou phosphorés et surtout l'éthylène peuvent également être citées. Quelques équipes françaises se sont par ailleurs impliquées dans le domaine émergent de la photo-PRC dans un contexte international très compétitif, où il s'agit maintenant de déclencher des processus de polymérisation dans le domaine du visible de faible énergie, avec des sources de lumière peu coûteuses.

À l'instar de la PRC, les polymérisations ioniques ont atteint aujourd'hui la maturité mais restent très importantes pour la production industrielle de polymères de spécialité et particulièrement importantes pour le design d'architectures macromoléculaires.

Des systèmes catalytiques permettant le contrôle de la polymérisation des oléfines et des diènes conjugués, *via* un mécanisme de transfert dégénératif, ont émergé et suscitent

un fort engouement. D'ores et déjà de nouveaux polymères issus de l'ingénierie macromoléculaire ont été industrialisés.

Le développement de polymères codés, dans lesquels les unités monomères sont agencées en une séquence précise *via* une chimie dite « de précision » et reposant sur des approches multi-étapes est un domaine qui progresse très rapidement. Il est maintenant possible de synthétiser de longues chaînes uniques codées et aussi de les lire facilement. Le prochain défi sera probablement d'accéder à des bibliothèques de chaînes, organisées en deux ou trois dimensions, permettant de stocker et de gérer la matière codée.

B. Polymérisations en milieux dispersants

Des laboratoires français ont, historiquement, apporté une contribution fondamentale dans ce domaine. Les développements visent essentiellement des applications dans l'eau, alors que le CO₂ supercritique tend à être utilisé comme solvant/dispersant de polymères, les phases dispersantes organiques étant dédiées à des applications spécifiques. Dans le domaine de la polymérisation en milieu dispersant, l'innovation la plus marquante de ces dernières années est l'auto-assemblage induit par la polymérisation (ou *polymerization-induced self-assembly*, PISA). Ce procédé PISA consiste à tirer profit des avantages de la PRC pour réactiver en solution des chaînes de polymère dans le but de polymériser un monomère donnant lieu à la formation *in situ* d'un bloc insoluble. La formation et l'auto-assemblage simultanés des copolymères à blocs conduisent à des particules de différentes morphologies (sphères, fibres, vésicules) à des taux de solide allant jusqu'à 50%. Un tel procédé permet de produire des latex sans tensioactifs. Ce domaine a rapidement profité de l'expérience des laboratoires français spécialistes de la polymérisation en émulsion et connaît un engouement fort à l'échelle inter-

nationale. Par les concepts auxquels il fait appel, le procédé PISA se situe à l'interface de la chimie macromoléculaire, de la physico-chimie et à certains égards aussi de la biologie. Au-delà du procédé PISA, les succès concernent également la préparation de particules hybrides dont l'importance ne cesse de grandir, le renouveau des recherches dans le domaine des latex de polyéthylène ou l'utilisation de la polymérisation par ouverture de cycle par métathèse (ROMP) pour la préparation de particules multi-fonctionnelles.

De manière générale, la morphologie des particules polymères obtenues en milieux dispersants conditionne fortement leurs propriétés. Le contrôle de ces propriétés nécessite donc d'associer la chimie et le génie des procédés dans les études en polymérisation. Au-delà des réacteurs « standards » de polymérisation en milieux dispersants, les procédés utilisant notamment la nano- et la microfluidique présentent des possibilités de mise en forme de particules, d'amélioration de transfert thermique, d'intensification de procédés grâce à des écoulements différents. Plusieurs laboratoires français possèdent une expertise en ingénierie de la réaction et en modélisation, permettant de développer des procédés plus performants.

C. Valorisation des bio-ressources, recyclage et dépolymérisation

Le renouveau de la chimie macromoléculaire implique aussi de développer des méthodes et des procédés de synthèse diminuant significativement la consommation d'énergie et la quantité de sous-produits avec un haut degré de fiabilité et de sécurité. La discipline doit ainsi évoluer en tenant compte de la réglementation et de la transformation vers un développement plus durable. Il s'agit notamment de s'affranchir progressivement de l'utilisation du pétrole comme ressource principale. L'utilisation de ressources renouvelables, qui ne

concurrent pas la chaîne alimentaire, est un domaine très actif pour le développement de matériaux éco-compatibles, qu'ils soient pour des applications de commodité ou à plus haute valeur ajoutée. Plusieurs équipes françaises sont très bien identifiées dans ce domaine, notamment concernant *i*) l'exploitation de polymères d'origine naturelle, tels que la lignine, les tannins, la cellulose ou le chitosane, *ii*) la valorisation de synthèses moléculaires bio-sourcés comme les terpènes, les huiles végétales, ou la noix de cajou et *iii*) l'utilisation du CO₂ en tant que co-monomère, par exemple pour la synthèse de polyuréthanes ou de polycarbonates.

Si les laboratoires académiques s'intéressent essentiellement à de nouveaux synthons, il apparaît que les monomères «de commodité» tels que l'éthylène, le butadiène ou le méthacrylate de méthyle deviennent accessibles par une voie non fossile. La préoccupation, en terme de polymérisation, concerne le développement de catalyseurs capables de polymériser ces monomères qui n'ont pas toujours les mêmes spécificités que les monomères issus du pétrole. Ceci positionne également certaines grandes familles de polymères dans un enjeu de développement durable.

Le futur des polymères va dépendre de l'analyse de leur cycle de vie dans le cadre d'une économie circulaire. De ce point de vue, l'éco-conception des matériaux et le recyclage chimique et mécanique sont des enjeux majeurs pour l'avenir.

D. Catalyse de polymérisation

Les catalyseurs métalliques restent très utilisés en chimie de polymérisation, non seulement pour la production de polymères de spécialité, mais aussi ceux de commodité. La catalyse de polymérisation des oléfines pour la production de différentes gammes de polyéthylènes (PEBDL et PEHD) et du polypropylène représente presque la moitié des matières plastiques. Cette industrie est toujours en forte

croissance et innove *via* la production de polyoléfines de hautes performances. L'utilisation de monomères gazeux sous pression exige à la fois une expertise en chimie et en «ingénierie de la réaction» pour gérer les problématiques de transfert de chaleur et de matière. Cependant peu de groupes dans le monde possèdent cette expertise, notamment en France, dans un secteur très important, qui a aussi pris une orientation vers une économie circulaire *via* la production de monomères bio-sourcés et le recyclage chimique et mécanique. Les domaines de la polymérisation des diènes conjugués pour la production de caoutchoucs synthétiques, de la copolymérisation des diènes conjugués avec des oléfines et de la synthèse de polystyrène stéréospécifique, font l'objet d'efforts de recherche soutenus avec un très bon positionnement des laboratoires nationaux. La synthèse de polyesters ou de polycarbonates par catalyse a connu un fort engouement du fait du caractère bio-sourcé des monomères. Des études relevant de la catalyse de polymérisation sont également menées pour la synthèse des polymères issus des polymérisations par étapes, des réactions de post-fonctionnalisation et de réticulation. Un objectif important vise à remplacer les métaux nobles et/ou toxiques. Ces activités de recherche sont menées par des groupes en forte interaction avec l'industrie chimique.

La catalyse organique qui se caractérise par l'absence d'un centre métallique a connu un bel essor au cours des quinze dernières années, notamment pour la polymérisation par ouverture de cycle, mais aussi pour la polymérisation des (méth)acrylates ou la synthèse de polyuréthanes. Les enjeux, aujourd'hui, semblent se situer au niveau du stéréo-contrôle de la réaction et au niveau des gains en termes de sélectivité et d'activité pour rivaliser avec la catalyse métallique qui reste actuellement bien plus performante. Plusieurs laboratoires français ont su se faire une place dans la compétition mondiale. La catalyse enzymatique a, en revanche, plus de mal à émerger, en raison du faible nombre d'équipes françaises impliquées dans ce domaine malgré l'importance des enjeux.

E. Renaissance en « *Ring-Opening Polymerization* »

Les matériaux (co)polymères obtenus par polymérisation par ouverture de cycle (*ring opening polymerization* ROP) représentent une part importante de l'industrie des « plastiques techniques ». C'est aussi par ROP que le poly(acide lactique), un des rares polymères issus de la biomasse, est produit industriellement.

La ROP utilise le plus souvent des composés organométalliques pour amorcer / activer les monomères hétérocycliques. Avec le développement de la catalyse organique et, dans une moindre mesure, de la catalyse enzymatique, de nombreux (co)polymères peuvent être maintenant synthétisés par des procédés de ROP combinant sélectivité et activité, sans par ailleurs être contaminés par des résidus métalliques toxiques.

Dans ce contexte, de nombreux travaux portent sur des réactions de copolymérisation par ouverture de cycle (ROcP) en associant de manière inédite des co-monomères afin d'atteindre de nouvelles propriétés. À ce titre, une perspective possible serait de « croiser » des monomères de réactivité très différenciée (hétérocycle et monomère vinylique par exemple).

Un autre enjeu dans ce domaine concerne la possibilité de contrôler la stéréochimie de la réaction de ROP par une voie non-métallique, notamment celle du lactide, pour obtenir un matériau biodégradable dépourvu de métal, aux propriétés thermomécaniques optimales.

Au delà d'aspects méthodologiques en catalyse de polymérisation (cf. paragraphe D), un certain nombre de monomères cycliques ont été (re)considérés ces dernières années, pour préparer des (co)polymères de hautes performances. Par exemple, des hétérocycles à trois chaînons tels que les épisulfures, les aziridines ou les éthers glycidiques ont suscité un regain d'intérêt. Il en est de même pour les phosphoesters cycliques à cinq chaînons,

tandis que le (ré)engouement pour la ROP des oxazolines semble perdre de la vitesse. De « nouveaux » monomères ont aussi été évalués en ROP, incluant notamment les cétènes acétals cycliques (polymérisables par voie radicalaire) ou des lactones à cinq chaînons d'origine bio-sourcée.

F. Chimie supramoléculaire et chimie dynamique

Les concepts de base de la chimie moléculaire, notamment la création d'interactions supramoléculaires et de liaisons covalentes dites dynamiques (réversibles), ont continué à être appliqués avec succès à la synthèse de matériaux polymères « intelligents ». Ceux-ci incluent notamment des polymères auto-réparables, de nouveaux polymères supramoléculaires et, bien sûr, les vitrimères qui ont été inventés par une équipe française.

Ces approches consistant à introduire des liens fragiles spécifiques au sein des chaînes, non seulement des polymères thermo-plastiques, mais aussi des polymères thermodurcissables, permettront certainement de reconsidérer le mode actuel de production et de gestion des matériaux polymères, en prenant en compte leur cycle de vie, en particulier leur recyclage. Les vitrimères peuvent, en particulier, changer de topologie sans perte de connectivité pendant leur réorganisation. Ce sont donc des réseaux infusibles même à haute température. Les chimies mises en jeu pour induire cette réversibilité des liaisons covalentes reposent généralement sur des réactions élémentaires simples : transestérification, transuréthanisation, etc. Un des enjeux dans ce domaine est de transposer ces concepts de chimie aux matériaux élastomères, à nouveau dans la perspective de leur recyclabilité.

Des équipes françaises se sont aussi distinguées par des résultats marquants concernant l'utilisation de la chimie supra-moléculaire dans des domaines variés comme l'électro-

nique organique, la catalyse ou les additifs rhéologiques.

G. Organique électronique

Cet axe thématique repose sur des développements nouveaux en chimie mais concerne également les matériaux et la physico-chimie.

De nouvelles avancées ont été réalisées ces dernières années pour augmenter le rendement de conversion des cellules photovoltaïques organiques (OPV). Ces avancées sont encore associées à la possibilité d'élaborer des polymères à «*low bandgap*» alternant unités monomères riches et pauvres en électrons. Des questions liées à la durée de vie des dispositifs, à la stabilité des interfaces, au contrôle de la morphologie de la couche active et à la qualité des électrodes se posent toujours.

Des efforts importants ont été consacrés à la synthèse de nouveaux synthons, de monomères et de polymères π -conjugués. Aussi, de nombreux travaux spécifiques portant sur une catalyse « plus propre » (sans métaux) ou la mise au point de procédés moins énergivores ont été rapportés dans la littérature.

H. Contrôle spatio-temporel des réactions de polymérisation

Au-delà du besoin de polymères fonctionnels « sur mesure », il est également nécessaire de pouvoir accéder aux propriétés et aux performances procurées par ces polymères « à la demande ». Il semble désormais possible de bien mieux contrôler les réactions de polymérisation dans l'espace et dans le temps. Cette thématique a percé depuis moins de dix ans, avec des inspirations venant de la nature où la production de protéines, d'acides nucléiques et de polysaccharides aide à réguler les systèmes multi-composants et à maintenir l'homéostasie.

Diverses stratégies ont été développées pour un tel contrôle des polymérisations, en mettant en jeu des stimuli externes, incluant l'utilisation de simples réactifs chimiques à réactivité retardée sous l'effet de la température, des réactions d'oxydo-réduction, l'application d'un courant, d'un faisceau lumineux ou d'une force mécanique.

Le potentiel (industriel) de ces technologies est évident et concerne de très nombreux matériaux à base de polymères, tels que les revêtements, les mousses, les adhésifs, les encres, les résines dentaires, etc. Ce domaine, dans lequel plusieurs groupes français se distinguent par leur expertise, est extrêmement actif et compétitif.

I. Fonctionnalisation de polymères réactifs

Longtemps perçue comme un « mal nécessaire », c'est-à-dire un processus à ne considérer que si la synthèse d'un polymère par voie directe se révèle impossible, la modification chimique de polymères par « post-polymérisation » a évolué de manière très significative au cours de la dernière décennie. La « post-polymérisation » repose sur des réactions élémentaires simples, comme la chimie de couplage thiol-ène ou thiol-yne, l'ouverture d'une fonction époxy par un nucléophile, des réactions formant des liens réversibles de type imine ou oxime par exemple, l'amidation d'esters activés, la réaction «*click*» de cycloaddition de Huisgen, et aussi des réactions dites multi-composants.

Des progrès importants ont été réalisés pour atteindre les critères d'idéalité de « post-polymérisation », à savoir la mise en œuvre des réactions rapides, dans des conditions équimolaires, avec de hauts rendements, de façon orthogonale, sans besoin de purification compliquée. Les travaux récents ont montré que les groupes fonctionnels peuvent être introduits avec une grande précision à divers endroits de la chaîne macromoléculaire. Plu-

sieurs réactions de modification peuvent même être menées à partir d'une seule et même fonction réactive. Si ces chimies s'avèrent en effet efficaces, les conditions réactionnelles limitent encore la possibilité d'un développement industriel.

L'introduction de fonctions ou de blocs spécifiques permet aussi d'atteindre les propriétés de surface ou d'améliorer la compatibilité d'un polymère avec des charges ou avec d'autres polymères.

Parmi les procédés de fonctionnalisation, l'extrusion réactive demeure très performante et permet de travailler sans solvant. Elle bénéficie des avancées en chimie pour un contrôle toujours plus précis des matériaux obtenus que ce soit des polymères fonctionnels, greffés ou chargés.

En **conclusion**, sur le plan industriel les « grands polymères » (polyéthylène, polypropylène, polychlorure de vinyle, polystyrène, etc.), contribuent grandement à notre vie quotidienne en raison de leur apport dans de nombreuses applications comme par exemple pour conserver des aliments et réduire le gaspillage alimentaire, isoler les bâtiments et les habitations et ainsi diminuer la consommation d'énergie, alléger les matériaux dans l'industrie automobile et celle des transports, en minimisant la consommation de carburant, pour constituer des réserves d'eau de pluie, ou encore pour stocker des résidus industriels. Cependant, faute de bien savoir les recycler, ils posent également des problèmes d'accumulation dans l'environnement, notamment dans les océans. Les experts de la chimie macromoléculaire et des matériaux sont conscients qu'ils doivent encore faire preuve d'imagination pour pouvoir s'affranchir progressivement du pétrole comme ressource principale, privilégier son remplacement par des ressources renouvelables, et également promouvoir le recyclage de ces matériaux. En parallèle, la communauté scientifique s'est emparée de la question du devenir et de l'impact des plastiques. Aujourd'hui, les polyméristes sont engagés dans une thématique émergente qui vise à une meilleure compréhension du

comportement des débris plastiques en milieu environnemental (eau, sol, air). En effet les micro et nanoplastiques se révèlent être de potentiels vecteurs de polluants. Cette problématique pluridisciplinaire implique les chimistes, les physico-chimistes et les biologistes.

II. Physico-chimie de la matière molle

Dans le périmètre de la section 11, la physico-chimie de la matière molle s'intéresse à des systèmes très variés incluant les molécules/macromolécules donnant lieu à des interactions intra- ou intermoléculaires à l'état solide ou liquide (hydrogélateurs, organogélateurs, homo- ou copolymères, lipides, cristaux liquides, tensioactifs...) ainsi que les dispersions colloïdales (mousses, émulsions, suspensions) et dans certains cas les polymères solides multiphasés (cf. partie « matériaux »). Les propriétés macroscopiques de ces systèmes sont contrôlées à une échelle mésoscopique définie tant par la nature des constituants (macro)moléculaires (systèmes monophasiques) que par la morphologie des dispersions (systèmes polyphasiques). La compréhension de ces systèmes complexes nécessite de les décrire à l'échelle mésoscopique et d'identifier les mécanismes à l'origine du lien entre phénomènes moléculaires et macroscopiques. La démarche d'investigation consiste à contrôler la force et la nature des interactions ainsi que l'organisation structurale et les dimensions caractéristiques associées pour comprendre les phénomènes et, de façon ultime, les modéliser. Le contrôle des paramètres chimiques d'un système constitue un outil de maîtrise de ses propriétés macroscopiques (cf. partie « chimie macromoléculaire ») voire d'examen de la généralité des modèles. L'étude physico-chimique permet donc de préciser les descriptions microscopiques dans les modèles en passant d'une approche essentiellement

phénoménologique à une description plus détaillée des structures et des interactions (aux échelles moléculaire et mésoscopique). La physico-chimie est donc d'une part une des clés du contrôle des propriétés macroscopiques de nombreux systèmes complexes et d'autre part une source de perfectionnement de modèles plus généraux issus de la physique (cf. partie « physique de la matière molle ») pour la description de systèmes spécifiques, comme le montrent les quelques exemples (non exhaustifs) décrits ci-dessous. La dynamique de mouillage d'un liquide fait intervenir des interactions de Van der Waals, la cinétique d'adsorption et la rugosité de surface. Plus généralement, l'écoulement d'un liquide à une échelle nanométrique est modifié par la structuration du liquide à cette échelle qui se traduit par la longueur de glissement qui dépend de la structure des (macro)molécules et de leurs interactions avec le substrat. Il est d'usage, dans de telles études de modifier de façon contrôlée les surfaces (greffage, texture) et les (macro)molécules. Le temps de vie d'une mousse ou d'une émulsion résulte de la combinaison d'interactions décrites par la théorie DLVO et de la cinétique d'échange surface/volume des molécules (stabilisants ou phase dispersée).

Dans ce qui suit, les derniers développements et les tendances émergentes dans l'élaboration d'objets et leur auto-assemblage en milieu monophasique, en surface et dans des milieux polyphasiques seront résumés. Enfin, les interactions entre des systèmes de la matière molle et des systèmes biologiques seront abordées.

A. Élaboration des objets

Les principaux objets d'étude sont les synthons macromoléculaires, les polymères en solution et à l'état fondu, les molécules amphiphiles, les cristaux liquides, les colloïdes et les assemblages moléculaires et supramoléculaires. Les méthodes d'élaboration suivent le plus souvent une voie ascendante (« *bottom-*

up ») dans laquelle les briques élémentaires sont produites puis organisées pour former les structures et conférer des fonctionnalités ciblées.

Les dernières avancées en chimie organique, macromoléculaire, supra-moléculaire et inorganique permettent l'élaboration d'objets originaux, mieux définis en composition chimique, masse molaire et architecture, et la maîtrise de leur état de dispersion et de leurs propriétés d'auto-assemblage ou de complexation.

En synthèse, il s'agit principalement des méthodes de polymérisations contrôlées et vivantes ou de chimie supramoléculaire par des mécanismes de scission/recombinaison, des procédés en milieu dispersé (particules ou capsules polymères). S'y ajoutent de nouvelles techniques pour l'élaboration de nanomatériaux à l'état solide (chimie, broyage, manipulation de poudres, mélange, ultrasons, irradiation, extrusion, *electrospinning*, couplage mécanosynthèse/frittage, chimie sol-gel...).

La grande variété des briques élémentaires mises en œuvre et des structures accessibles offre de très larges possibilités en termes de propriétés. Essentiellement trois stratégies peuvent être distinguées. D'abord, la mise en œuvre de réactions de polymérisation contrôlée en chaîne ou par étapes, pour l'obtention de macromolécules de longueur et de microstructure maîtrisées, conduit à de nombreuses possibilités d'associations non covalentes et de dynamiques d'échange. La synthèse de molécules capables de s'auto-assembler de façon supramoléculaire *via* leurs groupements fonctionnels (urée, amide, acide carboxylique, cycles aromatiques...) constitue une stratégie analogue. Ensuite la modification chimique de particules organiques (particules « tout carbone », nanocristaux de cellulose...) ou inorganiques (oxydes métalliques, quantum dots...) ont pour but de permettre leur dispersion dans le milieu souhaité voire de contrôler cette dernière à l'aide d'un stimulus physico-chimique. Cette modification peut être effectuée soit par une fonctionnalisation de la surface, soit par une polymérisation

amorcée depuis la surface. Enfin, la polymérisation en milieu dispersé qui combine toutes les possibilités de la chimie macromoléculaire avec celles issues du contrôle de l'état de dispersion et de la localisation des réactifs, permet de préparer des particules polymères de morphologies (matricielles ou capsules à cœur liquide) et propriétés de surface très diverses. Certains travaux abordent le contrôle des caractéristiques des dispersions finales (distribution de tailles) à l'échelle du réacteur pilote ou industriel, soit par une connaissance approfondie des aspects colloïdaux, soit en utilisant toutes les ressources du pilotage du procédé.

L'utilisation de briques biosourcées (protéines, brins d'ADN, bases nucléiques, acides aminés...) est une tendance émergente depuis plusieurs années, qui constitue une rupture et qui ouvre des perspectives nombreuses.

B. Auto-assemblages et complexes en milieu dilué ou concentré, en surface

Les objets de la matière molle interagissent *via* des forces qui correspondent toutes à des énergies de l'ordre de quelques $k_B T$ où k_B est la constante de Boltzman et T est la température ambiante (interactions de Van der Waals, électrostatiques, interactions de déplétion, liaisons hydrogènes, hydrophobes...). Les systèmes organisés réversibles qui en résultent sont notamment caractérisés par leurs dynamiques d'assemblage et de dissociation ainsi que par leurs durées de vie. Une fois constitués, ces assemblages peuvent interagir entre eux pour former des organisations à des échelles supérieures et conduire à des structures hiérarchiques.

Ces assemblages peuvent se former en volume ou sur une surface. Dans le cas des surfaces, l'assemblage peut se faire depuis une interface, par exemple les couches minces obtenues par la technique «couche

par couche», ou bien se faire par transfert de systèmes assemblés en volume vers une surface.

In fine, les propriétés macroscopiques des systèmes assemblés dépendent de leur structure et des forces d'interactions entre morphogènes. Du fait des faibles énergies d'interaction, une faible variation des conditions expérimentales (pH, température, concentration...) peut induire des transitions morphologiques. Ceci permet l'élaboration de systèmes «intelligents», *id est* stimulables, très étudiés durant ces quinze ou vingt dernières années. Ils sont généralement élaborés à partir d'au moins un constituant dont la structure est stimulable, par exemple un polymère à LCST ou UCST, ou encore un polyélectrolyte faible.

Historiquement, les études se sont focalisées sur les mécanismes d'auto-organisation de systèmes fondés sur un type d'objet (tensioactifs, macromolécules, colloïdes) formant des phases ordonnées à l'équilibre thermodynamique (cristaux liquides ou colloïdaux, phases cristallines lyotropes) qui sont assez bien compris. Cependant des recherches encore très actives s'intéressent à de tels systèmes lorsque les objets sont dispersés dans des phases continues non conventionnelles (suspensions colloïdales dans des liquides ioniques), qui nécessitent de revisiter les théories classiques.

Des approches, plus récentes, visent à former de nouvelles architectures par auto-assemblage en utilisant des associations pertinentes d'objets de natures différentes, impliquant parfois plusieurs types d'interactions pour former des phases variées : hydrogels et organogels physiques moléculaires et macromoléculaires, coacervats, complexes électrostatiques, complexes de macromolécules biologiques... Ces espèces hybrides peuvent concerner des objets interagissant entre eux, comme dans les complexes, ou n'interagissant pas directement mais co-organisés de façon structurée aux échelles nanométriques, comme par exemple des hydrogels réticulés double réseau ou des hydrogels dopés de protéines. Tous ces systèmes ne sont pas nécessai-

rement à l'équilibre thermodynamique et peuvent être piégés cinétiquement dans des minima locaux d'énergie libre avec des temps de vie caractéristiques très longs. Un point clef pour les applications de tels systèmes est de pouvoir associer/dissocier les espèces en fonction de l'environnement physico-chimique, par exemple pour la libération contrôlée de molécules.

Une thématique de recherche émergente vise à la formation maîtrisée de complexes hors équilibre par co-assemblage non-covalent d'espèces macromoléculaires ou colloïdales. La structure de l'état métastable peut être modulée par le chemin de formulation utilisé, *via* les paramètres physico-chimiques, par exemple par la sélectivité de solvant en nanoprecipitation, ou *via* le procédé (temps, ordre de mélange). Les techniques micro- et millifluidiques permettent notamment le contrôle fin de tels chemins de formulation.

Une stratégie émergente et en très fort développement pour le design d'architectures colloïdales complexes à façon consiste à guider l'assemblage, soit en utilisant des interactions directionnelles et/ou spécifiques entre objets (particules «*patchy*» ou fonctionnalisées en surface, interactions réversibles *via* l'hybridation de brins d'ADN) soit en jouant sur des effets entropiques subtils dans des mélanges de colloïdes binaires, en particulier lorsque ces mélanges impliquent des particules anisotropes. Ceci conduit à des structures originales uniques, qui peuvent généralement être prédites en amont par des simulations numériques, et qui ont des applications particulièrement importantes dans le domaine des méta-matériaux.

En suspension, des nano-architectures de morphologie contrôlée sont obtenues par copolymérisation *in situ*, *i.e.* par PISA. En surface, la génération électrochimique de morphogènes, molécules ou ions induisant une réaction chimique ou une interaction attractive entre deux (macro)molécules, permet le contrôle spatiotemporel de l'assemblage de films nanométriques sur des surfaces conductrices. Par ailleurs, l'auto-assemblage de peptides par voie enzymatique est un sujet de

recherche en pleine expansion. Réalisé en mélangeant le peptide et l'enzyme en solution, l'auto-assemblage est obtenu par modification chimique du peptide ou par protonation induisant la formation d'un hydrogel. Lorsque l'enzyme est immobilisée en surface puis mise en contact avec la solution de peptides, la couche d'hydrogel obtenue est de taille micrométrique.

C. Auto-assemblages/complexes aux interfaces/interphases

Une part importante des travaux de physico-chimie de la matière molle concerne des systèmes dispersés colloïdaux constitués de deux phases condensées ou d'une phase condensée et d'une phase dispersée gazeuse ou supercritique. Les interfaces y ont un rôle déterminant. La démarche générale vise à comprendre les liens entre la nature des objets, les phénomènes d'auto-organisation/de complexation aux interfaces, le protocole d'élaboration et les propriétés macroscopiques des systèmes dispersés (rhéologie, évolution temporelle).

Si le comportement des tensioactifs et des polymères amphiphiles (synthétiques ou naturels) aux interfaces liquide/liquide et liquide/solide a longtemps constitué une grande part des travaux, le domaine s'est renouvelé durant les dix dernières années avec l'émergence de nouvelles thématiques. Une tendance forte a été la diversification des espèces adsorbées aux interfaces, motivée entre autres par le souhait de limiter l'utilisation de tensioactifs moléculaires. Ainsi, le comportement de particules solides (dures ou molles, voire stimulables) aux interfaces liquide/liquide a concentré beaucoup d'attention, notamment pour la préparation d'émulsions dites de Pickering. De la même façon, l'adsorption aux interfaces liquide/liquide de complexes de biopolymères (polysaccharides ou polysaccharides/protéines) suscite un intérêt croissant. Une autre orientation a été la diversification

des systèmes dispersés eux-mêmes. Les mousses, le contrôle du comportement mécanique des interfaces liquide/gaz et les liens qui existent entre eux sont autant de sujets en émergence. Les émulsions eau-dans-eau ou huile-dans-huile sont aussi des sujets en développement, de même que les nouveaux stabilisants qu'elles font intervenir.

Beaucoup de ces sujets rejoignent la thématique des matériaux. Ainsi les mousses liquides sont des précurseurs de mousses solides. La compréhension des mécanismes de stabilisation des mousses et l'utilisation de polymères permettant de contrôler le comportement mécanique des interfaces sont autant de connaissances précieuses pour l'obtention de matériaux poreux ayant des performances inédites (isolation thermique ou phonique...). De façon plus large, différents systèmes dispersés peuvent être employés comme des précurseurs de matériaux (suspensions de particules inorganiques, mélanges de polymères de faible compatibilité...) de sorte qu'un nombre croissant de travaux se situent à l'interface du domaine des colloïdes et du domaine des matériaux et visent à atteindre des structurations de ces derniers à des échelles nanométriques.

D. Interactions avec les systèmes biologiques

Les liens entre la physico-chimie de la matière molle et les systèmes biologiques sont particulièrement marqués. Dans ces thématiques, les chercheurs de la section 11 sont particulièrement intéressés par les aspects d'élaboration des systèmes, les fonctions et la compréhension des mécanismes d'interaction avec un substrat. Deux axes d'études sont représentés : *i*) le développement d'objets ou de surfaces ayant une action thérapeutique et/ou de diagnostic et *ii*) l'utilisation d'outils ou de matériaux pour répondre à des questions biologiques.

1. Assemblages et interfaces à visée thérapeutique et/ou diagnostique

Les systèmes de la matière molle permettent d'offrir une palette riche d'assemblages ayant pour objectif la vectorisation de principes actifs. Ces assemblages sont à base de lipides, de phospholipides, de glycolipides, de composés fluorés, de dendrimères ou de copolymères amphiphiles (polymersomes synthétiques, dérivés d'acides aminés ou de sucres). Ils doivent encapsuler une quantité maximale de molécules bioactives (hydrophiles ou hydrophobes), être furtifs dans la circulation sanguine, cibler spécifiquement les cellules à traiter et enfin assurer une libération contrôlée du principe actif. Hydrophiles et non toxiques, leur furtivité est assurée par la présence de polymères non adsorbants vis-à-vis des protéines du sang. L'immobilisation d'anticorps reconnaissant une protéine, surexprimée par les cellules visées, permet un ciblage spécifique. Une alternative séduisante fondée sur la formation d'une empreinte de la protéine est actuellement explorée, en particulier au sein du revêtement polymère fonctionnalisant des nanoparticules inorganiques. La délivrance est assurée par endocytose suivie par la dégradation ou la dissociation de l'assemblage libérant ainsi le principe actif au sein de la cellule. Grâce aux développements récents en chimie macromoléculaire, de nouveaux systèmes médicamenteux sont développés tels que des macromolécules à action cytolytique (induisant la rupture de la membrane cellulaire) ciblée sur les cellules tumorales ou encore à action angiogénique comme alternative aux anticorps monoclonaux. Afin d'améliorer l'efficacité et le ciblage des traitements anticancéreux, deux stratégies sont en plein essor. D'une part, la thérapie photodynamique permet de traiter localement les cellules tumorales par production d'espèces réactives de l'oxygène sous irradiation lumineuse. Dans ce cadre, des (macro)molécules complexes associant un photosensibilisateur, un *quencher* et une molécule de ciblage sont développés. D'autre part, l'approche théranostique permet simultanément le suivi de la biodistribution par imagerie par résonance magnétique et la déli-

vance contrôlée *in vivo*. Ainsi des nanoparticules d'oxyde de fer fonctionnalisées, jouant le rôle d'agent de contraste, permettent une hyperthermie locale sous champ magnétique induisant une libération contrôlée du principe actif par perméabilisation des assemblages.

De nombreuses thérapies chirurgicales font appel à des biomatériaux qui soulèvent des questions de biointégration (colonisation par les cellules du tissu lésé) et/ou d'infection bactérienne. L'ingénierie de surface par adsorption ou greffage de polymères permet de moduler les interactions de ces matériaux avec l'environnement biologique. La caractérisation des interactions protéines/biomatériaux est toujours d'actualité avec l'utilisation des outils pointus de la protéomique. Les propriétés hydrophiles ou hydrophobes des polymères immobilisés permettent d'inhiber ou de favoriser la colonisation cellulaire. La fonctionnalisation par des peptides d'adhésion (par exemple RGD tripeptide d'Arginine, Glycine et Aspartate) est largement utilisée pour induire l'adhésion sur des surfaces anti-adhérentes vis-à-vis des cellules. Dans le domaine des cellules souches (capables de se différencier en tous types cellulaires), l'utilisation des propriétés de surface des matériaux pour induire leur différenciation est une thématique émergente. D'une part, les caractéristiques intrinsèques (mécaniques, topographiques, chimiques), des surfaces permettent une différenciation spécifique des cellules souches («matériobiologie»). D'autre part, les revêtements de polyélectrolytes permettent d'immobiliser une grande quantité de facteurs de croissance, rendant possible une présentation plus efficace que lorsqu'ils sont en solution. Des surfaces antibactériennes sont également développées permettant la libération locale d'agents antimicrobiens au niveau du site d'implantation. Ces types de revêtements sont des alternatives à l'administration d'antibiotiques par voie systémique. Les surfaces peuvent être soit bactériostatiques (empêcher l'adhésion bactérienne) soit bactéricides (tuer les bactéries) par contact ou libération de principes actifs. L'étude de revêtements ou de matériaux polymères auto-défensifs, *i.e.* actifs uniquement en présence des pathogènes, est

en pleine expansion. L'action bactéricide est obtenue par libération du composé antimicrobien soit par changement local de pH dû à la présence des bactéries soit par la dégradation des revêtements par les enzymes produites par les bactéries.

2. Outils ou matériaux répondant à des questions biologiques

Contrôle des populations

La maîtrise des propriétés physico-chimiques de systèmes dispersés a permis le développement technologique d'outils permettant d'étudier différents systèmes biologiques. Ainsi, les forces générées par des filaments d'actine ont été étudiées grâce à l'assemblage contrôlé de microparticules magnétiques fonctionnalisées par des molécules induisant leur polymérisation. Utilisant la technologie millifluidique, l'encapsulation de bactéries ou de cellules uniques dans des capsules d'hydrogels calibrées à haut débit offre un outil de choix pour leur criblage, l'étude des biomolécules sécrétées ou le développement de nouveaux médicaments. Cette technologie ouvre aussi la voie à l'ingénierie tissulaire où le contrôle de l'organisation cellulaire tridimensionnelle est recherché.

Contrôle des interactions cellules/surfaces

La maîtrise de la chimie de surface offre un moyen unique d'étudier la réponse cellulaire à différentes (macro)molécules. Des modèles membranaires de cellules ou de bactéries (monocouche, bicouches planes ou vésiculaires) sont développés pour l'analyse qualitative et quantitative des interactions molécule/membrane, dans leurs aspects cinétiques, mécanistiques et fonctionnels. Le contrôle spatiotemporel de l'adhésion cellulaire est un outil de choix permettant la manipulation à l'échelle de la cellule unique. L'utilisation de polymères thermostimulables permet de faire adhérer ou de détacher les cellules de manière contrôlée

grâce à l'élévation de température. L'utilisation originale de la chimie click afin d'immobiliser des peptides d'adhésion sur une surface microstructurée en présence des cellules peut être notée. Des circuits microfluidiques fonctionnalisés par des polymères ou endothélialisés, *i.e.* recouverts de cellules endothéliales fonctionnelles, sont développés afin d'étudier la dynamique de globules rouges ou de lymphocytes T.

Ces quelques exemples montrent comment la physico-chimie de la matière molle peut être à l'origine d'outils d'étude quantitative de phénomènes biologiques.

III. Matériaux

Les matériaux supra- et macromoléculaires, qui sont au cœur des thématiques de la section 11, regroupent de nombreuses sous-catégories qui forment parfois des communautés à part entière avec leur littérature propre : thermodurcissables, thermoplastiques, (nano)composites, matériaux moléculaires, gels, agromatériaux, matériaux biosourcés, hybrides... Les matériaux peuvent être ainsi de commodité, structuraux ou fonctionnels et s'inscrivent dans des défis sociétaux majeurs comme le transport, l'énergie, la santé, le développement durable et l'émergence de matériaux intelligents et stimulables (« *smart materials* »)

Pluridisciplinaire par nature, le domaine des matériaux fait intervenir de nombreux acteurs thématiques pour leur élaboration, leur transformation (chimie des polymères et supra-moléculaire, physico-chimie, matière molle, génie des procédés) et pour la caractérisation de leurs propriétés (rhéologiques, mécaniques, propriétés physiques de transport, électriques, acoustiques, optiques ou électroniques). Les projets collaboratifs, tels qu'ils sont pratiqués comprennent quasi-systématiquement des chimistes, physico-chimistes, des spécialistes de caractérisation structurale ou fonctionnelle, voire des spécialistes d'autres

champs disciplinaires (physique, mécanique, santé, biologie...).

Par delà la nature du matériau lui-même, la thématique est, depuis de très nombreuses années, pilotée en partie par les applications à court ou moyen terme, répondant à des enjeux sociétaux et/ou économiques portés par un secteur industriel encore très dynamique à l'échelle française et européenne. Ce secteur, directement lié à des applications identifiables et porteur d'innovations, offre des perspectives valorisantes et se positionne donc en concurrence avec les recrutements scientifiques académiques.

En raison de la grande diversité des matériaux et des questions scientifiques s'y rapportant, il est difficile de structurer leur description par problématiques scientifiques ou approches méthodologiques. Le choix a donc été fait de structurer cette partie sur les matériaux en fonction des usages et enjeux sociétaux : *i*) les matériaux de structure : thermoplastiques, élastomères, thermodurs, composites, nanocomposites, multimatériaux en interaction avec les communautés de mécanique et de physique statistique, *ii*) les matériaux innovants à propriétés spécifiques : conductivité, transport, barrière ou membranes, optiques, diélectriques, acoustiques, qui nécessitent de prendre en compte des domaines variées de l'hydrodynamique ou de la physique de la matière condensée, *iii*) les matériaux biosourcés, issus de la polymérisation de monomères, transformés ou natifs, en lien avec la chimie (catalyse de polymérisation, modification) mais aussi le contrôle de la ressource, en interaction avec d'autres organismes de recherches comme l'INRA et *iv*) les matériaux pour la santé ou biomatériaux, en lien avec le domaine médical, incluant des matériaux hybrides, pour lesquels l'efficacité fonctionnelle et la biocompatibilité sont des problématiques centrales.

A. Matériaux de structure

Les matériaux de structure sont principalement destinés à résister, sans rompre, à des sol-

licitations mécaniques. Les polymères sont très largement utilisés pour cela, en raison de la très grande diversité de leurs propriétés mécaniques, de leur légèreté par rapport aux autres classes de matériaux et de leur bonne processabilité : selon leur nature, ils apportent une raideur spécifique élevée, acceptent une grande déformation de façon réversible et sans rupture, présentent un bon comportement en fatigue, ou bien possèdent d'excellentes capacités d'adsorption d'énergie mécanique lors d'un choc. Les améliorations de ces propriétés peuvent avoir un impact social significatif puisqu'elles concernent des matériaux utilisés en abondance.

Une meilleure compréhension du comportement mécanique avec pour objectif une modélisation, et donc un dimensionnement des pièces plus performant, reste d'actualité en ces temps où l'impact environnemental devient un souci majeur. Cette question par nature pluridisciplinaire implique davantage de chercheurs en mécanique, soucieux d'intégrer dans les lois de comportement nécessaires à ce dimensionnement, les mécanismes physiques de la déformation. La thématique ancienne de la transition vitreuse et des mécanismes relaxationnels dans les polymères vitreux continue donc d'intéresser les chercheurs. Elle est tout particulièrement pertinente lorsqu'il s'agit d'appréhender les propriétés de résistance au choc ou de dissipation d'énergie à haute fréquence. Cette thématique bénéficie du développement croissant de la simulation, qui permet l'étude de systèmes toujours plus grands et donc une meilleure gestion/compréhension des transitions des échelles moléculaires aux échelles macroscopiques (cf. § VI). Elle est aussi alimentée par la synthèse de nouveaux polymères dont la structure chimique implique différents types de liaisons intermoléculaires (plus ou moins faibles, réversibles ou échangeables, cf. § I) et donc rend plus difficile la compréhension et la prévision de leur comportement mécanique.

Ainsi, ces nouveaux matériaux sont souvent nanostructurés du fait des séparations de phases qu'impliquent la présence d'unités chimiques parfois très incompatibles. La mobilité du polymère aux interfaces ou confiné peut s'en trouver

modifiée et avoir des conséquences sur la réponse mécanique de ces matériaux. Cette question est également posée dans l'étude des polymères semi-cristallins, dont les polyoléfinés, matériaux très abondamment utilisés dans de nombreuses applications et qui continuent d'être le sujet de nombreuses publications scientifiques. Là encore, la simulation (avec l'appui d'une modélisation physique des phénomènes) semble une voie très prometteuse pour progresser dans la compréhension du comportement mécanique... Elle est généralement complétée par des approches expérimentales qui bénéficient de techniques de synthèse de systèmes modèles de mieux en mieux contrôlés, qui permettent, en parallèle, une optimisation du matériau. Par ailleurs, les progrès constants des techniques de caractérisation microstructurale, généralement utilisée sous déformation, permettent une meilleure connaissance des différents processus mis en jeu. Dans ce cadre, un rapprochement, très pertinent, entre la communauté des physiciens des polymères et celle des mécaniciens peut être constaté ces dernières années, afin de traiter le problème de la fatigue des matériaux polymères de structure, problème jusque-là essentiellement abordé de manière macroscopique et phénoménologique. Ceci est valable pour les matériaux semi-cristallins et aussi pour les élastomères qui ont suscité un vif regain d'intérêt ces dernières années. La compréhension, et donc la maîtrise, des propriétés en fatigue de ces matériaux reste un enjeu important pour de très nombreuses applications. Le lien entre ces propriétés et l'architecture du réseau élastomère est de mieux en mieux compris. Son étude bénéficie pour cela de collaborations plus étroites entre les chimistes – notamment *via* l'intégration dans l'élastomère de groupes chimiques mécano-sensibles capables de renseigner sur les événements précurseurs de la rupture – les mécaniciens et les physiciens (en particulier, pour leurs approches de physique statistique). L'optimisation des matériaux de structure peut être obtenue *via* une chimie inventive (nouveaux copolymères, nouveaux systèmes de réticulation, etc., cf. § I) mais aussi *via* des formulations innovantes. Il s'agit le plus souvent de comprendre les relations entre le procédé qui génère une structure

et les propriétés mécaniques. Les aspects mécaniques et de durabilité des composites à renforts microniques sont surtout pris en charge par les mécaniciens, mais ces matériaux intéressent également les polyméristes quand il s'agit d'améliorer le procédé et d'optimiser et de caractériser les interfaces.

L'étude des nanocomposites reste d'actualité pour les chimistes et physiciens des polymères, même si une très grande diversité de charges/renforts nanoscopiques a déjà été étudiée. Les liens entre les interfaces et interphases et la réponse mécanique de ces matériaux restent un sujet d'étude.

L'architecturation à l'échelle macroscopique, préalablement à la mise en œuvre, est une autre voie d'amélioration des propriétés des matériaux de structure. Cet important travail de design pourra, dans les années à venir, bénéficier des progrès de l'intelligence artificielle. Une partie de la très forte communauté française travaillant sur les mousses (organiques et inorganiques) s'est emparée de ce sujet. Par ailleurs, le développement considérable de procédés innovants, comme la fabrication additive (impression 3D), rend possible des architectures (parfois bio-inspirées) de complexité croissante. La maîtrise du cycle de vie et la question de la recyclabilité est toutefois une préoccupation sociétale majeure. Il faudra davantage l'intégrer dans la conception des matériaux, impliquant la compréhension de leurs mécanismes de vieillissement. Cette question, par essence très pluridisciplinaire, est rendue plus ardue par la complexification des formulations et architectures des multi-matériaux. Ce défi pourra être relevé, grâce à l'utilisation de matériaux biosourcés, la synthèse de polymères et additifs biodégradables, ou à l'architecturation de matériaux facilitant le recyclage.

B. Matériaux innovants à propriétés spécifiques

Les polymères occupent une place de choix en constante évolution dans la classe des maté-

riaux à propriétés spécifiques. Leur comportement mécanique, allié à des modes de mise en œuvre aisés, leur confèrent des atouts non négligeables vis-à-vis des autres familles de matériaux (métalliques, céramiques, inorganiques). Ils couvrent un large éventail de propriétés allant des propriétés en masse (basées sur les mécanismes liés aux transports d'électrons ou d'ions, l'optique, l'acoustique, l'existence de barrières ou la fonction de séparation) aux propriétés en surface (en lien avec la mouillabilité, l'adhésion, la friction, la lubrification contrôlées...). Les matériaux de fonction représentent l'exemple type de l'exploitation de l'ensemble de la chaîne allant de la chimie à la physicochimie jusqu'aux matériaux, chaîne ancrée sur les disciplines socles de la section. Ils constituent un domaine de recherche riche et varié, très dynamique où les acteurs cherchent sans cesse à améliorer la fonction et la compréhension des relations structure-propriétés ainsi qu'à innover pour développer de nouvelles fonctions en étroite relation avec la perpétuelle évolution des enjeux sociétaux.

En ce qui concerne les matériaux conducteurs, les approches de synthèse et l'utilisation d'objets conducteurs tels que les nanotubes de carbone et plus encore à l'heure actuelle le graphène occupent des places de choix dans le développement de ces matériaux. La recherche de films transparents et conducteurs est, par exemple, un défi à relever pour remplacer l'oxyde d'étain (ITO). Les recherches s'intensifient également autour du développement de matériaux thermoélectriques avec les objectifs d'atteindre des performances améliorées et de mieux comprendre les phénomènes de conduction électrique et thermique ainsi que leur couplage.

Pour les matériaux électro/photoactifs, la synthèse de copolymères à blocs donneurs et accepteurs d'électrons, les systèmes auto-assemblés, l'introduction au sein des matériaux de groupes ou agents structurants pour faciliter le transport des charges par une meilleure organisation du matériau sont autant de voies de recherche développées dans le domaine du photovoltaïque organique. L'assemblage des différents matériaux au sein de la cellule et la

gestion des interfaces sont également des aspects importants et nécessaires à traiter pour aller jusqu'au dispositif.

Les recherches se sont également intensifiées ces dernières années sur les différents moyens d'associer polymères et liquides ioniques (LI) (mélanges, greffage, imprégnation de supports membranaires poreux, confinement de liquides ioniques dans des membranes de NTC, association de LI et de semi-conducteurs électroniques...) avec l'objectif d'élaborer des membranes conductrices ioniques, des membranes pour la séparation du dioxyde de carbone, le stockage d'énergie... Les questions fondamentales relèvent du choix des briques de base, de la structuration des LI au sein du matériau, de leur mobilité, de leur accessibilité selon les degrés de confinement et de la limitation de leur migration potentielle pour conserver des systèmes stables.

Pour les mousses, la compréhension des mécanismes contrôlant la structuration des mousses solides, dont dépendent les propriétés, sont un enjeu majeur. En particulier, une meilleure compréhension des mécanismes de nucléation, croissance des cellules et solidification en lien avec, d'une part les procédés utilisés et leurs paramètres de contrôle et d'autre part le choix des matériaux (nature, rhéologie, ajout de plastifiants ou de charges) est d'une importance capitale. Il en va de même pour l'utilisation de charges, fibres pour s'orienter vers de nouvelles structures et atteindre de nouvelles propriétés mécaniques et acoustiques... Enfin l'élargissement des études de compréhension des mécanismes de formation de systèmes poreux jusqu'aux aérogels contribue aux voies de recherche en pleine expansion.

L'assemblage de matériaux à structure multi-échelle et un contrôle de la cinétique de formation des assemblages (en lien étroit avec les approches de physico-chimie) peuvent donner naissance à des comportements très intéressants dans le domaine de l'optique. Une large palette de nanomatériaux à base de métaux nobles est explorée dans ce cadre en faisant varier la nature des objets, leur forme, leur constitution (monomatériau ou matériaux de type cœur/écorce). La structuration au sein

de polymères, copolymères, gels voire mousses de résonateurs à réponses électriques et magnétiques déterminées est également au cœur de recherches en plein essor concernant le domaine des métamatériaux. De la même façon, la structuration de matériaux à propriétés mécaniques contrôlées permet de concevoir des métamatériaux acoustiques. La capacité à élaborer des nano-objets de constitutions et formes variées ainsi que la capacité à diriger les auto-assemblages font partie des axes de recherche essentiels pour le développement de ces nouveaux matériaux.

Le contrôle du transfert de matière au sein des systèmes à base de polymères régit le vaste domaine allant des membranes de séparation jusqu'aux matériaux barrière et les enjeux de «l'ultra-barrière». Ces axes de recherche sont indissociables des enjeux sociétaux liés, en particulier, au domaine de l'énergie (pile à combustible, batteries, récupération du CO₂, organique flexible, transport et stockage d'hydrogène...). Les approches (nano)composites alliant polymères et (nano)charges ou multianocouches mettent en jeu des problématiques de structuration et la gestion des interfaces qui sont des clés de l'optimisation des propriétés des matériaux.

L'apport et le contrôle de propriétés de surface fait également partie des enjeux des matériaux de fonction allant de surfaces super-hydrophobes à des surfaces à propriétés d'adhésion, friction ou lubrification contrôlées. Dans ce cadre, outre les voies de modifications chimiques par greffage, des voies de texturation de surface originales, allant de la nano-structuration par des ions aux interfaces polymères hydrophobes/eau à la construction d'édifices de nanocouches par la voie «couche par couche ou *layer-by-layer*» en passant par la diversité des approches plasma, sont des voies de développement en plein essor.

C. Matériaux biosourcés

Sous la pression de la demande sociétale pour des matériaux à plus faible impact envi-

ronnemental, mais également en raison de leurs propriétés spécifiques, les matériaux bio-sourcés sont maintenant considérés par de nombreux acteurs du domaine des matériaux les traitant indistinctement de ceux issus de ressources non-renouvelables. Cependant, généralement ces matériaux nécessitent des approches méthodologiques qui diffèrent de leurs homologues synthétiques. Il est indispensable, entre autres, de prendre en compte leurs propriétés intrinsèques et l'origine de la ressource. De ce point de vue, une distinction peut être faite entre les matériaux polymères issus de monomères bio-sourcés, dont la problématique relève pleinement de la chimie macromoléculaire (voir section I), de ceux qui sont utilisés en tant que tels, directement après extraction, purification et éventuellement modification. Parmi ces derniers, une distinction peut également être faite entre les matériaux transformables (amidon, protéines, lignines...) qui se comportent comme des thermoplastiques et ceux non transformables (cellulose, chitine) qui sont utilisés comme des charges ou des renforts.

1. Les matériaux biosourcés transformables peuvent être utilisés en substitution de matériaux thermoplastiques après formulation (plastification, modification...) et les progrès récents portent sur le développement de nouvelles approches de type extrusion réactive ou incorporation de nanocharges. Ces matériaux souffrent cependant de performances moindres en raison de leur manque de stabilité thermique et leur sensibilité à l'eau, mais l'essor récent de l'utilisation de ce type de matériaux, en particulier dans l'emballage ou les produits de grande consommation (pour se conformer à la législation européenne en évolution), incite à s'intéresser de près à leurs comportements. L'apport d'une approche fondamentale de caractérisation et d'établissement de relations structures-propriétés pertinentes apparaît essentielle dans ce domaine pour accompagner les démarches de formulation et tirer le meilleur parti de ces matériaux.

2. Les matériaux biosourcés non-transformables, utilisés essentiellement en volume, comme les fibres ligno-cellulosiques,

sont envisagés comme matériaux de renfort, avec une filière structurée depuis de nombreuses années en pôles d'excellence portés par les collectivités locales et les industries agro-alimentaires. D'un point de vue scientifique, la rationalisation de la compréhension de ces matériaux se heurte à la complexité et la variabilité de ces substrats due à leur origine. Les progrès récents ont porté sur l'amélioration des méthodes de mesure et la prise en compte de la polydispersité dans les modèles de prédiction, ainsi que sur le développement de méthodes de compatibilisation.

Lors des dernières années, la thématique, liée aux nanocharges bio-sourcées, s'est considérablement développée. C'est tout particulièrement le cas des nanocelluloses. Cet accroissement de production est visible à la fois dans la littérature scientifique et dans le dépôt de brevets. Portée par une industrie papetière et agro-alimentaire, désireuse de valoriser ses produits ou sous-produits, et par l'engouement pour ce qui est bio-sourcé, cette thématique pose un grand nombre de questions scientifiques liées aux spécificités de ces objets (anisométrie, propriétés de surface, chiralité...).

Enfin, des matériaux naturels d'usage séculaire (textile, papier, bois, cuir, soie...) qui jusqu'alors n'étaient étudiés que dans leur contexte applicatif direct, peuvent maintenant être considérés comme des matériaux polymères à part entière et bénéficier d'une approche scientifique relevant pleinement des thèmes de la section ou ils peuvent constituer des sources d'inspiration pour l'élaboration de matériaux biomimétiques.

D. Biomatériaux

Dans le domaine des biomatériaux, le développement de systèmes tridimensionnels capables d'être colonisés par des cellules et permettant leur prolifération est en pleine expansion, répondant au besoin de l'ingénierie tissulaire, dédiée à remplacer tout ou partie

d'un organe défaillant. Les matériaux peuvent être obtenus par des méthodes conventionnelles (par gélification physique ou chimique, utilisation de porogène, fluide supercritique) ou de prototypage (électrofilage de nanofibres c'est-à-dire électrospinning, lithographie, impression 3D). La bioimpression 3D de polymères avec les cellules est un domaine foisonnant qui ouvre la voie à la reconstruction de tissus multicellulaires et stratifiés. Un des enjeux de cette technique est la mise au point d'une bioencore biocompatible aux propriétés rhéologiques adéquates. De même, les matrices hydrogels injectables offrent la possibilité de délivrer et d'assembler *in vivo* des cellules souches au pouvoir thérapeutique. Les matrices fondées sur des polymères synthétiques ou naturels doivent être non-seulement biocompatibles, assurer la diffusion des nutriments (grâce à leur porosité) mais également guider la colonisation cellulaire. Le contrôle de leurs propriétés mécaniques est primordial pour induire l'adhésion cellulaire : dureté et viscoélasticité optimales sont spécifiques à un type cellulaire. Les gels interpénétrés (présentant au minimum deux types de réseaux) sont l'objet d'intenses développements grâce à des améliorations synergiques de leur résistance ou leur ténacité. De plus, l'introduction de la chimie dynamique dans ces gels permet leur réarrangement sous sollicitations mécaniques. Par ailleurs, l'introduction de groupements protéolytiques (dégradables par les enzymes produites par les cellules) qui favorise ainsi la migration et la prolifération cellulaire peut être notée. Enfin, l'immobilisation de biomolécules (facteurs de croissance) sous forme de gradient est recherchée afin de guider la colonisation cellulaire du matériau.

En guise de **conclusion**, il convient de souligner qu'une préoccupation commune aux chimistes, physico-chimistes et spécialistes des matériaux est la provenance des matières premières, le devenir des matériaux après usage et la réduction des déchets générés tout au long de leur cycle de vie.

IV. Physique de la matière molle

La physique de la matière molle est centrée sur l'étude de la structure et de la dynamique des systèmes de polymères, de colloïdes, de tensioactifs, ou de cristaux liquides ainsi que leur réponse à un champ extérieur, le plus souvent une déformation mécanique. Si la section 11 a une forte interface avec la section 5 par l'étude de phénomènes physiques communs, elle s'en distingue néanmoins essentiellement à travers les systèmes étudiés pour lesquels la physico-chimie a un rôle essentiel. Ces systèmes présentent une très large gamme de réponses temporelles et d'échelles spatiales pertinentes pour la description de leur structure et de leur dynamique. Cependant, de nouveaux systèmes, partageant le même type de comportement ou posant de nouvelles questions, apparaissent. Ainsi, la matière active continue de susciter un engouement expérimental important, en forte connexion avec des avancées théoriques en physique statistique hors équilibre. Désormais, il devient possible d'envisager des matériaux dont les propriétés sont issues des caractéristiques propres des systèmes actifs. Ces systèmes sont de plus motivés par des questions relevant de la physique des systèmes biologiques vivants. Enfin, les développements expérimentaux récents dans la fabrication de dispositifs à l'échelle nanométrique permettent de sonder les écoulements aux très petites échelles et offrent de nouvelles descriptions des systèmes historiques de la matière molle.

A. Les systèmes de la matière molle

1. Polymères

Dynamique et écoulement

Les polymères, que ce soit les solutions concentrées, les fondus et éventuellement les

phases vitreuses, possèdent une très large gamme de temps de relaxation. La réponse de ces systèmes à une contrainte mécanique revêt une grande importance à la fois fondamentale et pour les applications. La compréhension de ces temps en fonction de la nature des interactions, dans des conditions de confinement, ou près d'une surface (par exemple pour décrire la mécanique des matériaux composites), reste un sujet d'actualité. Des développements instrumentaux tels que la microscopie à champ proche ou la diffusion de la lumière ont permis de sonder ces dynamiques sur des gammes spectrales et spatiales de plus en plus larges. Dans le régime de la réponse linéaire, l'utilisation de sondes de contraintes locales a permis de comprendre les mécanismes de grande déformation, de la génération de l'écoulement jusqu'à la fracture du matériau. Ces expériences sont à placer en regard de modèles micromécaniques de plus en plus raffinés, dans lesquels les interactions hydrodynamiques sont de mieux en mieux prises en compte.

Polymères aux interfaces et effets de confinement

L'étude des propriétés dynamiques des polymères à une interface a connu des progrès récents, en particulier près de la transition vitreuse. Aux mécanismes de glissement des élastomères, des fondus de polymères, et des solutions de polymères, de mieux en mieux compris, s'ajoute l'étude du glissement et du frottement des hydrogels, notamment dans les hydrogels chargés.

En particulier, le rôle de la déformabilité des surfaces et de l'énergie élastique qu'elles peuvent stocker, dans les mécanismes de friction et d'adhésion sont des sujets d'actualité.

2. Systèmes auto-assemblés

Rhéologie et dynamique lente

Les systèmes vitreux présentent des hétérogénéités spatiales et stockent localement de la

contrainte, qui peut être lentement relaxée. La compréhension des mécanismes de relaxation, du couplage entre les relaxations de différentes zones du système reste un sujet d'actualité. Différents outils (microscopie optique ou de force atomique notamment) ont permis de caractériser ces relaxations. Le lien avec les propriétés rhéologiques, par exemple le fluage, est étudié en associant des mesures rhéologiques et de diffusion du rayonnement sous écoulement. À l'instar des comportements des systèmes polymères aux grandes déformations, ces travaux s'appuient sur des progrès théoriques importants dans les modèles micromécaniques et l'introduction de la physique de la réponse linéaire. Ils ont, de plus, une importance dans la création de nouveaux matériaux, dont les propriétés finales dépendent de la façon dont le matériau vitreux a été préparé.

Auto-assemblage

L'auto-assemblage de particules colloïdales continue d'être une thématique importante, motivée notamment par la formation de nouveaux matériaux, tels que les cristaux photoniques à large bande interdite ou les métamatériaux pour l'optique. L'utilisation de leur auto-assemblage offre une voie alternative aux techniques de nanofabrication et est rendue possible grâce à la compréhension fine des mécanismes associés. Ainsi, des efforts ont été fournis afin de synthétiser des particules colloïdales possédant des symétries spécifiques susceptibles de contrôler leur assemblage. D'autres directions explorent l'auto-assemblage sous champ ou contraint par la présence d'une phase continue structurée par des phases de tensioactifs ou de polymères.

Cristaux liquides

La même motivation (la formation de nouveaux matériaux pour l'optique) a conduit à un regain d'intérêt pour les cristaux liquides. Une approche consiste à fabriquer des particules colloïdales formées elles-mêmes de cristaux liquides, afin de conférer à leur auto-assem-

blage une structure particulière. Sont alors utilisées des contraintes topologiques (par exemple en plaçant les cristaux liquides dans une sphère ou une coque) permettant de contrôler la nature et le nombre de défauts. Cela permet de générer des particules possédant des fonctionnalités liées à la présence des défauts, précisément réparties sur leur surface. Par ailleurs, la génération de défauts topologiques statiques et dynamiques en volume, à l'équilibre ou hors équilibre, a permis de développer de nouveaux matériaux pour leurs propriétés optiques.

B. Thématiques aux interfaces

1. Séchage et mouillage de systèmes complexes

Une part importante de l'activité dans le domaine de la physique de la matière molle est motivée par la réalisation de matériaux et par l'amélioration ou la compréhension du comportement de matériaux. Cependant, la mise en œuvre des systèmes de la matière molle constitue aussi un axe de recherche important qui fait appel à des compétences de plus en plus pointues en physique du transport. En effet, si la compréhension de leur écoulement est généralement suffisante, dans de nombreux procédés, cet écoulement est associé à des transports de matière induits notamment par le séchage ou le mouillage. Le mouillage d'une surface par un liquide complexe a été étudié dans différents régimes, sur des surfaces hydrophiles ou hydrophobes. La dynamique du mouillage et celle des gouttes elles-mêmes est bien établie. Les recherches dans ce domaine s'orientent d'une part dans la compréhension du mouillage dans des conditions très éloignées du cas idéal (surfaces non contrôlées, composition du fluide complexe...) conditions motivées par des applications industrielles et d'autre part vers la prise en compte des phénomènes de transport de plus en plus riches dans la description des phénomènes interfaciaux (échanges thermiques, changements de phase aux interfaces par

exemple). Enfin, la génération de contraintes internes lors du séchage d'une suspension colloïdale est importante car elle conditionne les propriétés fonctionnelles du matériau sec : ses propriétés mécaniques, son adhésion au substrat... De nouveaux dispositifs microfluidiques permettent d'étudier le séchage des suspensions colloïdales dans des géométries et des conditions de transport extrêmement contrôlées et ont permis la compréhension des mécanismes en jeu qui contrôlent la microstructure et le stockage de la contrainte lors du séchage.

2. Confinement et transport

Les écoulements aux échelles nano-métriques sont présents dans les films et jouent un rôle important dans la stabilité des mousses ou des émulsions. Il est aussi important de comprendre les propriétés de ces écoulements aux échelles ultimes de quelques nanomètres. Plusieurs types d'expériences permettent de réaliser ces mesures, soit en étudiant l'écoulement près d'une surface, soit en milieu semi-infini. Néanmoins, le confinement dans des tubes ou entre des parois distantes de quelques nanomètres ont montré, qu'à des échelles inférieures à 5 nm, les lois de l'écoulement étaient profondément changées. Leur description implique la compréhension des propriétés électroniques du substrat et des interactions électroniques entre le substrat et le liquide. Les mécanismes de ces écoulements sont étudiés à la fois par nanofabrication de nanopores ou nanofeuillets et par appareil à force de surface. La compréhension de ces mécanismes ouvre la voie à de nouveaux mécanismes de séparation. Outre les liquides simples, les mécanismes d'écoulement des électrolytes en milieu confiné ont de nombreuses applications liées à la conversion de l'énergie : batteries ou piles à combustibles par exemple.

3. Matière active

Les systèmes actifs sont composés de particules capables de convertir l'énergie stockée dans l'environnement, souvent sous forme

chimique, en énergie cinétique pour s'auto-propulser. L'énergie injectée à l'échelle microscopique, au niveau de chaque particule, est transmise aux grandes échelles où des comportements collectifs émergents sont observés. La matière active connaît un engouement croissant à la fois pour ses applications pratiques envisagées, son importance en biologie et parce qu'elle pose des questions fondamentales de physique statistique hors équilibre. Il est ainsi envisageable d'utiliser un système actif afin de réaliser des moteurs très efficaces. Par ailleurs, l'utilisation des propriétés actives afin de produire de nouveaux matériaux est un axe de recherche qui commence à se développer. Enfin, se développe l'étude des macromolécules biologiques qui possèdent une structure interne (filaments d'actine, microtubule, ADN) en milieu confiné : de nouvelles structures, dues au confinement apparaissent, leur dynamique reste à résoudre. Le transport de ces bio-filaments dans des gradients de champ est à l'origine de nouveaux mécanismes de moteurs.

Certaines problématiques citées ci-dessus se retrouvent naturellement dans la thématique « Interface physique-biologie ».

V. Interface physique-biologie

L'interface entre la physique et la biologie fait partie intégrante des thématiques de la section 11 depuis maintenant une vingtaine d'années. Les outils et les concepts interdisciplinaires de la physique et de la physico-chimie de la matière molle se sont, en effet, révélés particulièrement adaptés pour appréhender certains aspects de la matière biologique, par exemple pour caractériser ses propriétés rhéologiques à l'équilibre et hors d'équilibre, déterminer comment elle répond à des sollicitations mécaniques ou chimiques extérieures, ou comprendre l'émergence d'une organisation aux

méso-échelles à partir d'interactions physico-chimiques entre un grand nombre de « briques élémentaires » (molécules, cellules ou bactéries). Réciproquement, les systèmes vivants ont également servi d'inspiration pour développer une physique de la matière molle hors équilibre – une forme de « matière active », sans que la problématique biologique soit nécessairement la motivation principale. Ce dernier champ est actuellement en plein essor un peu partout dans le monde. Bon nombre de travaux à l'interface physique-biologie résultent de collaborations étroites entre expérimentateurs et théoriciens, dans la pure tradition des activités interdisciplinaires développées dans la section.

La section 11 réaffirme son plein soutien à cette interface⁽²⁾ et remarque qu'elle est très attractive vis-à-vis des jeunes chercheurs.⁽³⁾ Ceci pose une difficulté à la section qui est dans l'impossibilité de répondre à cette pression sans mettre en péril l'équilibre thématique entre les diverses disciplines qui cohabitent dans la section.

L'interface avec la biologie représente un champ d'action très large et concerne un nombre important de sections : les sections 02, 04, 05 de l'INP, la section 08 de l'INSIS, les sections 11 et 16 pilotées par l'INC, les sections 20, 21 et 22 de l'INSB et les commissions interdisciplinaires 51 et 54 peuvent ainsi être citées. Avec l'essor remarquable et extrêmement positif de l'interface physique-biologie, les problématiques étudiées en section 11 se diversifient, avec des systèmes qui, en devenant de plus en plus pertinents pour la biologie, se complexifient. Cela peut, parfois, créer des difficultés pour l'évaluation et le recrutement des chercheurs à l'interface physique-biologie, en particulier en raison du langage et d'un état de l'art spécifiques à chaque système étudié. L'évolution des thématiques et des systèmes à l'interface physique-biologie est cependant un signe de vitalité scientifique. Dans un contexte inquiétant de réduction de poste, les interfaces risquent d'être les premières à souffrir. En raison du nombre important de candidatures de grande qualité aux concours et du dynamisme remarquable de ce champ disciplinaire, il convient de s'interro-

ger sur les moyens de soutenir l'interface physique-biologie en section 11, et de façon plus large au niveau du CNRS, sans doute en concertation étroite avec les autres sections concernées.

Dans la suite, quelques domaines marquants de l'interface physique biologie en section 11 sont décrits.

A. Systèmes reconstitués et bio-mimétisme

1. Membranes et cytosquelette

Les bio-polymères du cytosquelette cellulaire, par exemple l'actine, et les membranes lipidiques constituent deux objets « traditionnels » de l'interface physique-biologie en section 11.

D'une part, les biopolymères et les membranes sont étudiés séparément. Des études récentes visent à mieux comprendre comment l'association de chacun avec des protéines purifiées *in vitro* conduit à des modifications de leurs propriétés physiques ou, réciproquement, comment des propriétés physiques telles que la tension ou la courbure modulent l'accrochage de protéines, ce qui peut conduire à des accrochages allostériques, du *clustering*, ou des séparations de phase.

D'autre part, il existe de plus en plus d'expériences visant à associer membrane et cytosquelette dans des systèmes reconstitués pour mimer des architectures cellulaires aux méso-échelles, étudier comment elles se forment, mais aussi se brisent. L'ajout de moteurs moléculaires peut induire la contractilité et la réorganisation de ces structures. Le contrôle géométrique des assemblages joue un rôle essentiel et peut être obtenu en maîtrisant la concentration des protéines dans l'espace et dans le temps. L'outil microfluidique, le contrôle physico-chimique des surfaces, ou plus récemment le contrôle optique ou magné-

tique de l'activité de protéines a permis de faire des progrès sensibles dans cette direction.

2. Compartiments sans membranes-proto-cellules : un champ émergent

Les cellules eukaryotes renferment des « granules » – compartiments qui ne sont pas délimités par une membrane lipidique. Il a été observé au cours de ces dix dernières années que ces « granules » se comportent physiquement comme des gouttelettes liquides hors équilibre, échangent de la matière et de l'énergie avec le milieu environnant et se forment par un processus d'autoassemblage encore mal compris. Ces compartiments renferment un condensat de biomolécules (ARN, protéines...) et servent de réacteurs biochimiques dont le dysfonctionnement est associé à l'infection virale, le cancer et les maladies neurodégénératives.

Il existe de nombreuses analogies entre les granules cellulaires et la physico-chimie des coacervats – des phases denses de particules colloïdales obtenues par séparation de phase liquide-liquide – en phase aqueuse, les premiers pouvant même servir d'inspiration aux physico-chimistes pour créer les seconds. Réciproquement, la formation par démixtion de gouttelettes contenant de l'ADN ou de l'ARN apparaît comme un système modèle pour la formation de « proto-cellules » *in vitro* et s'intéresser aux origines de la vie. Des analyses théoriques indiquent déjà que la forme de ces gouttelettes peut être couplée aux réactions chimiques qui ont lieu en leur sein, conduisant à des cycles de croissance/division spontanée d'une gouttelette en deux. Des stratégies expérimentales sont par ailleurs développées pour contrôler la formation de condensats ARN-protéines *in-situ*, à l'intérieur des cellules.

Cette thématique de recherche est en expansion rapide dans le monde, notamment en Allemagne et aux États-Unis. Elle est également émergente en section 11 et est appelée à se renforcer dans les prochaines années. La culture des chercheurs de la section en physique et physico-chimie de la matière molle

semble en effet particulièrement appropriée pour contribuer au développement de cette thématique en plein essor dans un contexte international compétitif.

En dehors des granules liquides, des systèmes moléculaires réactifs ont été développés pour contrôler dans l'espace et dans le temps la concentration des espèces chimiques (ADN, enzymes) et arriver à un processus de morphogénèse moléculaire. Cette activité de biologie synthétique *in vitro*, bien qu'à la marge des activités de la section 11, est très dynamique dans le contexte international.

Plus généralement, un objectif à long terme du bio-mimétisme '*bottom-up*' serait de produire une cellule synthétique à partir d'un nombre minimal d'ingrédients moléculaires, ou du moins de mimer certaines fonctions cellulaires comme l'aptitude à se diviser ou à se mouvoir. Il est à noter que plusieurs initiatives de grande envergure ont été entreprises dans ce sens en Europe (Pays-Bas et Allemagne) et aux États-Unis pour fédérer les compétences interdisciplinaires des laboratoires nationaux. À la lumière de ces investissements massifs à l'étranger, il existe un risque que la France prenne un retard sur la concurrence dans un champ d'intérêt majeur et compétitif dans lequel elle a longtemps été pionnière.

B. ADN, assemblages supramoléculaires – physique du noyau

Le terme « biophysique » est souvent compris par une partie de la communauté scientifique, en particulier en biologie structurale, comme une science qui s'intéresse à la structure des protéines, à leurs changements de conformations, ainsi qu'à la relation entre structure et fonction. Les techniques telles que la RMN, la diffusion des rayons X, ou plus récemment la cryo-microscopie, sont essentielles aux avancées de ce domaine. Cette composante de l'interface physique-bio-

logie ne relève pas à proprement parler du champ d'action de la section 11. Cependant certaines activités s'en rapprochent comme, par exemple, l'étude structurale des phases denses d'ADN dans les capsides virales qui peuvent être reproduites *in vitro*, l'étude de l'assemblage des capsides virales, ou des assemblages de fibres amyloïdes. Dans ce type d'étude, la maîtrise des interactions physico-chimiques est essentielle à la compréhension des assemblages obtenus.

De nombreux groupes de recherche dans le monde (et également en section 11), étudient l'organisation de l'ADN dans le noyau et comment cette organisation conditionne la transcription des gènes. Ce champ de recherche bénéficie de techniques de biologie moléculaire qui ont permis de caractériser l'organisation spatiale de la chromatine dans le noyau, en particulier en mettant en évidence des interactions entre *loci* génomiques distants le long la chaîne linéaire d'ADN. L'organisation de la chromatine en domaines topologiquement associés a pu être décrite à partir de la physique des transitions de phase. La physique des polymères à blocs a aussi été pertinente pour décrire et prédire les cartes d'interaction entre *loci* au sein de la chromatine. Enfin, le développement rapide des techniques optiques de super résolution et le suivi de molécules individuelles (ARN, protéines) permet aujourd'hui d'étudier la dynamique spatio-temporelle des fonctions génomiques, comme la transcription de l'ADN en ARN.

Ces thématiques sont à l'interface avec la section 4 pour l'optique et la section 21 pour l'organisation des génomes et la bio-informatique.

C. Mécanique et biologie

La mécanique joue un rôle essentiel dans bon nombre de processus biologiques, comme par exemple la division ou la motilité cellulaire, la circulation sanguine, la cicatrisation d'un

tissu, la morphogénèse d'un embryon, ou la mécanosensibilité auditive de l'oreille interne.

1. Rhéologie de la matière biologique

La caractérisation mécanique des systèmes biologiques a d'abord consisté à réaliser des mesures rhéologiques « actives » (mesures du mouvement en réponse à une force extérieure) ou « passives » (mesures de fluctuations). Les forces peuvent être exercées à l'échelle de l'assemblage de cellules (tissus ou amas), à l'échelle de la cellule unique, ou même à l'échelle sub-cellulaire par exemple par le biais de nanoparticules manipulées avec des pinces optiques ou magnétiques.

Comme cela peut être fait dans un matériau polymère complexe, le but de ces expériences de rhéologie est d'extraire les propriétés viscoélastiques des systèmes étudiés, leur dépendance en fréquence et de caractériser l'hétérogénéité des propriétés intracellulaires.

Le sang fournit par ailleurs un exemple de liquide complexe – une suspension de cellules, dont la circulation a fait l'objet de nombreuses études au cours de ces dix dernières années, par exemple pour mieux comprendre les mécanismes qui conduisent à la vaso-occlusion. L'outil microfluidique a permis de fabriquer des canaux artificiels dont il est possible de contrôler la géométrie et les propriétés physico-chimiques de surface. Ces études expérimentales sont souvent combinées à des modélisations et simulations numériques 2D/3D, démontrant à nouveau des interactions fructueuses entre expérimentateurs et théoriciens.

Récemment, la confrontation des résultats de rhéologie active et passive a permis de quantifier le caractère hors équilibre de la matière biologique – son activité mécanique, notamment en appliquant les théorèmes de fluctuations ou en développant de nouveaux outils de thermodynamique statistique. Là encore, la biologie a servi d'inspiration à la physique, en favorisant le développement de la physique hors équilibre, un sujet d'intérêt

qui se retrouve également dans les sections 02 et 05.

Il peut être noté que les expériences de mécanique à l'échelle de la molécule unique, même si elles continuent à être représentées en section 11, semblent en léger retrait par rapport au passé au profit d'études sur de larges groupes de molécules/cellules mettant en évidence l'émergence d'effets collectifs.

2. Émergence de mouvements collectifs

Les systèmes biologiques ont la propriété de pouvoir se mouvoir sans force extérieure. Les contraintes géométriques, notamment le confinement, ainsi que des propriétés physiques et physico-chimiques du substrat, jouent un rôle essentiel sur le comportement cellulaire observé. Les études récentes se caractérisent par un changement d'échelle, passant d'études à l'échelle de la cellule unique il y a une dizaine d'années, à des études à l'échelle de tissus bidimensionnels, et plus récemment d'agrégats cellulaires tri-dimensionnels (sphéroïdes ou organoïdes) puisqu'il est maintenant connu que la migration cellulaire sur un substrat bidimensionnel est loin de représenter le comportement réel de cellules migrant dans un tissu tridimensionnel.

L'encapsulation cellulaire dans des capsules d'alginate permet de contrôler la différenciation de cellules souches et de les délivrer dans un organe récepteur, ouvrant, à la fois, une voie possible de transfert vers la médecine et une méthode permettant de contrôler finement l'environnement cellulaire pour des études plus fondamentales.

Dans les tissus bidimensionnels, les interactions d'alignement entre cellules allongées ont permis de décrire les tissus en termes de « cristaux liquides (nématiques) actifs ». La dynamique et les interactions des défauts topologiques qui se trouvent aux jonctions entre régions d'orientations différentes pourraient être à l'origine de transitions de réorganisation, par exemple d'un tissu bidimensionnel à un amas cellulaire tridimensionnel. Là encore,

L'apport de la modélisation physique et des simulations numériques est essentiel pour comprendre les phénomènes physiques en jeu. Ces considérations s'appliquent également aux colonies bactériennes, un autre champ de recherche dynamique qui relève de la matière active. Les objets individuels (cellules ou bactéries) de la matière biologique (tissu ou colonie) établissent des interactions à courte distance (adhésives, par exemple) et à longue distance (flux hydrodynamiques entre cellules distantes, par exemple). Ces interactions génèrent un ordre aux méso-échelles qui se traduit par une organisation collective, comme par exemple la formation de vortex sur un tapis de cellules bronchiques ciliées ou dans les colonies bactériennes.

Ces thématiques de l'interface physique-biologie se retrouvent également en sections 05 et 22. Le domaine de la matière active a connu une croissance très forte ces dernières années et est encore en expansion.

3. Mécanobiologie : rétroaction entre contraintes mécaniques, flux de matières, et expression génétique

Les échanges, de plus en plus approfondis, avec la communauté des biologistes ont fait évoluer la mécanique cellulaire et tissulaire vers la « mécanobiologie », également appelée « mécanotransduction ». L'intérêt ne se porte plus seulement sur la réponse mécanique de l'objet biologique à une sollicitation extérieure mais aussi sur les modifications chimiques ou génétiques induites par le stress mécanique à l'intérieur du système.

Le couplage entre la contrainte mécanique et la signalisation chimique dans la cellule peut moduler l'expression de gènes et, en retour, induire une modification des propriétés mécaniques et/ou des réorganisations cellulaires. À l'échelle multicellulaire, les gradients mécaniques induisent des flux de matière contenant des signaux chimiques. Ces rétroactions sont essentielles aux processus morphogénétiques, qui peuvent être abordés sous l'angle de la physique non-linéaire des systèmes dynamiques.

Par conséquent, les études mécaniques de la « matière active » s'accompagnent aujourd'hui, en collaboration étroite avec les biologistes, d'études moléculaires, fondées notamment sur l'observation microscopique de marqueurs fluorescents. Les chercheurs physiciens ou physico-chimistes doivent donc se familiariser avec des techniques et méthodes venant de la biologie (séquençage d'ADN, mutagenèse dirigée, biochimie et purification des protéines...).

La mécanobiologie est également une thématique forte en section 22. L'intérêt en section 11 porte sur la description, la compréhension et le contrôle physique et physico-chimique des mécanismes en jeu dans la mécanosensibilité des systèmes.

VI. Théorie et simulation pour la matière molle

Les approches théoriques développées pour l'étude de la matière molle prennent des formes très diverses, selon les échelles d'espace et de temps considérées. Au cours des cinq dernières années, de nouvelles questions expérimentales ont conduit à un renouvellement de ces approches, en particulier au niveau de la rhéologie, de la mécanique des systèmes polymères et des cristaux liquides. Du point de vue théorique, il a également fallu inclure de nouveaux sujets concernant l'organisation des matériaux actifs ou dotés de propriétés de motilité propre, ainsi que les tissus biologiques. Plus complexes, ces sujets deviennent de plus en plus importants en recherche contemporaine.

Dans les années à venir, il sera incontournable d'aborder les questions d'organisation non classique, fondée sur des dynamiques hors équilibre ou sur une structuration guidée par une information externe.

Ce chapitre présente les différents sujets relatifs à ces questions selon l'échelle spatio-temporelle déterminante des propriétés spécifiques des systèmes physiques concernés.

A. Échelle moléculaire

À l'échelle moléculaire, les modèles analytiques et numériques détaillés peuvent conduire à des découvertes et des applications très originales lorsqu'ils sont appliqués à la chimie et aux sciences des matériaux qu'ils contribuent donc largement à renouveler. Par exemple, une réflexion théorique sur les origines de l'élasticité et des barrières de relaxation dans les polymères a fait émerger l'idée originale de séparer l'énergie associée à la cohésion d'un matériau et celle mise en œuvre lors d'un réarrangement chimique. De cette façon, il est possible de concevoir un système polymère libéré de certaines des contraintes thermodynamiques classiques et de lui conférer ainsi des propriétés mécaniques novatrices. Ces nouvelles propriétés permettent, par exemple, un réarrangement topologique à énergie constante, c'est-à-dire qu'il est possible d'accéder à des modifications chimiques majeures dans un réseau polymère, sans apport d'énergie d'activation chimique. Ce concept théorique a stimulé le design de tels matériaux, les vitrimères, qui sont aujourd'hui élaborés expérimentalement. Ces matériaux peuvent ensuite constituer une base de réflexion théorique pour étudier des mécanismes similaires à l'œuvre soit dans des matériaux vitreux comme la silice, soit dans de nouveaux matériaux. Il est attendu de ces nouveaux matériaux qu'ils soient à la fois stables et faciles à manipuler, au sens d'une modification de configuration géométrique ou dans l'idée d'un recyclage. Il s'agit maintenant de poursuivre les études déjà en cours pour définir et contrôler de nouveaux systèmes, qu'il est envisageable de solliciter par une stimulation externe.

Une question encore plus vaste en science des matériaux consiste à définir jusqu'à quel

degré il est possible pour un « *intelligent designer* » d'imaginer un matériau nouveau dont il puisse définir les propriétés. C'est un problème à la fois conceptuel, puisqu'il faut bien concevoir la complexité des propriétés envisagées, et expérimental, puisqu'il faut à terme aboutir au matériau avec les propriétés désirées. Dans ce cadre, le monde biologique offre de multiples exemples qui suscitent la réflexion et qui interrogent sur ce qui est à l'origine de l'extrême précision des éléments qui le constituent. Deux caractéristiques du monde vivant, qui le distinguent *a priori* du monde des matériaux, peuvent être retenues mais qui sont aujourd'hui davantage insérées dans la modélisation des matériaux : d'une part la consommation d'énergie, d'autre part l'information, telle que le marquage chimique au niveau des protéines, pour des fonctions de transport ou de placement, et au niveau de l'ADN lors de la transcription. En science des matériaux, si la consommation d'énergie est largement étudiée dans les systèmes actifs, les questions sur la « structure informationnelle » sont encore peu développées. En biologie, la consommation d'énergie et l'information se combinent, comme cela est observé dans le cadre de corrections cinétiques où la dépense énergétique est directement reliée au degré de fiabilité du processus de réplication de l'ADN. Le fait d'approfondir le lien information-énergie dans l'assemblage et la structuration de composants de matériaux constitue en soi une voie théorique qui implique à la fois la thermodynamique des processus irréversibles et les simulations numériques fondées sur ces principes. Il est à prévoir que cette approche théorique sera un acteur majeur de la science des matériaux, comme de la biophysique, de demain.

B. Échelle mésoscopique

Les propriétés de la matière molle se manifestent le plus souvent à une échelle mésoscopique de son organisation, ce qui autorise une simplification dans l'approche descriptive de ces matériaux. La description de type « *coarse*

grain» est adaptée, aussi bien d'un point de vue analytique qu'informatique, et permet ainsi de simplifier l'approche tout en conservant les descripteurs essentiels du phénomène sous-jacent. Un exemple typique des avantages de cette simplification dans le domaine des polymères est qu'elle permet de relier des contraintes topologiques à des propriétés rhéologiques, sans entrer dans le détail de tous les degrés de liberté des polymères. Tant que le système est considéré à l'équilibre thermodynamique, cette approche est suffisante. Cependant, elle nécessite un complément de description théorique dès lors que le système est loin de l'équilibre. C'est ainsi que de nouvelles études portent sur la cristallisation des polymères ou sur des flux hydrodynamiques rapides, par exemple, dans les situations aussi extrêmes que le *spin-coating* ou le dépôt de films ultra-minces.

Ce principe de simplification *coarse grain* est actuellement à l'étude pour décrire la matière active hors équilibre. L'étude des propriétés auto-organisatrices d'objets individuels non coordonnés s'inspire de la création de motifs mésoscopiques dans des systèmes physiques passifs, lorsqu'ils sont soumis à des forces et instabilités hydrodynamiques et mécaniques. Une question pertinente consiste à se demander si une dynamique spontanée peut produire de nouveaux motifs mésoscopiques de la matière, correspondant à de nouveaux états accompagnés de nouvelles propriétés. Les modèles fondés sur les particules type *coarse grain*, qui font donc l'économie de descriptions chimiques détaillées, offrent un outil privilégié au théoricien pour se concentrer sur les principes organisationnels qui régissent ces systèmes.

Au niveau intermédiaire de cette description théorique, des liens entre la physique des polymères et la façon dont les brins d'ADN s'enroulent autour des histones dans les chromosomes sont établis. Des progrès notables ont été faits dans la compréhension des échelles de temps impliquées dans la dynamique de l'ADN chromosomique lors de processus cellulaires spécifiques, grâce à l'analogie avec des mécanismes explicites dans le

cadre de la physique des polymères. La dérégulation de processus dynamiques standard dans les chromosomes peut être associée à une pathologie. Une telle approche « épigénétique » de la maladie est complémentaire des approches biophysiques communes fondées sur la dynamique individuelle de molécules.

L'utilisation de marquage et d'information encodée constitue également un domaine de recherche actif. Des particules colloïdales fonctionnalisées avec des fragments d'ADN, judicieusement sélectionnés, permettent l'établissement de liens spécifiques entre les particules lorsqu'elles sont mélangées, mais aussi de programmer des configurations particulières, complexes, guidées par ces liens.

À ce jour, les connaissances acquises dans le domaine de l'auto-organisation par fonctionnalisation ne permettent pas encore d'accéder à la complexité connue dans le monde du vivant, même au niveau de systèmes passifs comme la capsid d'un virus, d'où la nécessité de poursuivre ce type d'approches dans des cadres de complexité augmentée. Les bases théoriques de ces travaux sont encore très rudimentaires.

C. Descriptions continues et macroscopiques de la matière

Une description continue de la matière permet un recul vis-à-vis des propriétés structurales détaillées pour mettre l'accent sur les propriétés de symétrie et les lois de conservation, en accédant directement aux propriétés macroscopiques du système étudié. Ce type de description peut être statique ou dynamique, pour étudier respectivement les aspects élastiques ou hydrodynamiques de phénomènes.

L'organisation des cristaux liquides est déterminée par des énergies élastiques bien décrites théoriquement et leurs états multiples, aux applications très nombreuses, sont fonction de la géométrie et des conditions aux limi-

tes. Dans les années à venir, la maîtrise théorique des phases de cristaux liquides enrichis de particules dont la taille est supérieure à celle des molécules du cristal sera possible et devra permettre la création de nouveaux matériaux structurés aux propriétés émergentes originales, par assemblage multi-composants, multi-échelles.

La description continue de matériaux isotropes et anisotropes en mouvement est souvent inspirée de matériaux et systèmes biologiques. Des objets fortement anisotropes dans une situation loin de l'équilibre thermodynamique forment une matière nématique active, qui peut présenter des formes de comportement turbulent, donc un écoulement hydrodynamique complexe. Par ailleurs, la croissance et le mouvement de cellules dans des tissus constituent de nouvelles formes d'écoulement hydrodynamique, dont la description théorique peut s'appliquer au développement embryonnaire comme à la croissance tumorale. Il est fondamental de s'interroger sur ce qui, dans l'hydrodynamique conventionnelle, doit être modifié pour rendre compte de la spécificité de processus d'écoulements dans les tissus vivants. Une meilleure compréhension théorique de la dynamique de ces écoulements permettra de mieux interpréter l'évolution de groupes cellulaires, de tissus et, à long terme, de maladies, en interface avec le milieu médical. Il est donc clair que cette approche mécanique et hydrodynamique continue de la matière est tout à fait pertinente et à l'avant-garde de développements fondamentaux à la fois en biologie et en science des matériaux, pour des avancées médicales significatives, dans un cadre multidisciplinaire.

D. Méthodes transverses

De façon complémentaire aux approches théoriques à différentes échelles décrites ci-dessus, d'autres méthodes théoriques prennent de l'importance aussi bien auprès des théoriciens que des expérimentateurs. Parmi ces

méthodes, il y a un véritable essor des techniques de « *machine learning* », par exemple dans le cadre de l'estimation de l'énergie potentielle effective d'un système à partir des résultats de calculs numériques quantiques. Un autre exemple est l'optimisation de la paramétrisation d'une simulation de type *coarse grain*, sur la base de nombreuses simulations à l'échelle inférieure.

Il est important de noter que dans les années à venir, les expérimentateurs vont engendrer de telles quantités d'information qu'une approche *big data* sera nécessaire pour extraire et synthétiser l'information pertinente et pour mieux construire les modèles qui permettent l'exploitation et l'interprétation de ce grand nombre de données. Les microscopes modernes avec acquisition vidéo conduisent à une source gigantesque de données, dont l'analyse peut être faite sur la base de celles appliquées à des simulations de type Monte-Carlo ou en dynamique moléculaire : il s'agit donc d'une mise en commun d'outils développés par les théoriciens avec les expérimentateurs.

Dans d'autres domaines, tels que l'analyse d'images tomographiques, une reconstruction améliorée est possible avec l'aide d'algorithmes avancés de traitement de données fondés sur une approche bayésienne. Ce type d'algorithme permet de réduire le temps d'acquisition pour une précision donnée, et donc de réduire la quantité de radiation que reçoit un patient (ou un échantillon). De telles méthodes computationnelles de traitement de l'information, où la quantité de données qui y donnent accès est réduite, nécessitera dans le futur de plus en plus d'interactions transdisciplinaires entre les théoriciens de la matière molle, les mathématiciens, les expérimentateurs bio-physiciens et biologistes, afin qu'ils définissent ensemble les nouvelles approches algorithmiques d'acquisition, de traitement et d'analyse des données. Une telle évolution, de si vaste ampleur ne peut pas être limitée à un type de système et devra donc se faire à une échelle dépassant largement celle de la section 11.

VII. TGIR

Les travaux menés par les chercheurs de la section 11 s'appuient sur l'utilisation importante⁽⁴⁾ de Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR), principalement les synchrotrons et les centres de diffusion neutronique⁽⁵⁾. Cette forte utilisation provient du fait que les techniques de diffusion de rayonnement des rayons X et des neutrons permettent la caractérisation structurale, en volume et aux interfaces, des briques constitutives de la matière molle (nanoparticules, polymères, tensioactifs, protéines...) et de leurs assemblages aux échelles pertinentes (1 nm – 100 nm), ainsi que l'étude de leur dynamique sur des grandes gammes temporelles par des techniques spectroscopiques⁽⁶⁾. Elles permettent en particulier de réaliser des types de mesures uniques, telles que la détermination de la conformation de polymères dans des fondus par diffusion des neutrons par substitution isotopique H/D ou le suivi cinétique ultra-rapide de la croissance de nanoparticules par diffusion des rayons X grâce au flux intense du rayonnement synchrotron. En outre, les techniques d'imagerie directe de radiographie et tomographie par rayons X et/ou neutrons sont actuellement en plein essor et permettent la caractérisation structurale de systèmes organisés aux échelles mésoscopiques (1 μm – 1 mm) tels que les mousses ou les émulsions.

La communauté scientifique française bénéficie actuellement d'un large accès à ces types de TGIR combinant, pour chacune des techniques, une source nationale située sur le plateau de Saclay – respectivement le synchrotron Soleil et Laboratoire Léon Brillouin (LLB) utilisant le réacteur Orphée – et la source européenne située sur le sol français à Grenoble, respectivement *l'European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) et l'Institut Laue Langevin (ILL), ces deux dernières sources étant actuellement parmi les meilleures au monde.

Ce paysage extrêmement favorable est actuellement en forte mutation, en particulier en ce qui concerne la neutronique. La France

est en effet engagée comme partenaire dans la construction de *l'European Spallation Source* à Lund (Suède), qui devrait fournir son premier faisceau de neutrons en 2023 et atteindre son plein régime de fonctionnement vers 2030. Le gain en flux sur cette nouvelle source, basée sur la technique de la spallation, devrait être extrêmement substantiel par rapport aux sources existantes et permettre l'avènement de nouveaux types d'expériences, par exemple des suivis cinétiques rapides par diffusion de neutrons. L'utilisation de cette source dont le coût financier est très conséquent ne sera cependant optimale que si la communauté reste très active à l'horizon 2025. Or il a été décidé de fermer le réacteur Orphée, qui fournit les neutrons des instruments du LLB, en octobre 2019. Ce laboratoire va devoir faire évoluer ses missions de source nationale (formation, accueil de nouveaux utilisateurs, réalisation d'expériences ne nécessitant pas un très haut flux) et les utilisateurs n'auront plus accès qu'à la part du temps de faisceau de l'ILL dévolu à la France (25 % du temps total). Il existe ainsi un risque important que la communauté s'étiole et/ou vieillisse dans les années à venir. Pour pallier ce problème, le LLB propose 2 actions importantes : *i*) à court terme, la création de 4 instruments de type *Collaborating Research Group* (CRG) dont 2 instruments de diffusion aux petits angles (environ 80 à 85 % des expériences de diffusion neutronique des chercheurs de la section 11), et *ii*) à moyen terme, un projet de source de neutrons compacte permettant de disposer de 10 instruments dont les performances seront équivalentes à celles des instruments du LLB installés sur le réacteur Orphée.

En ce qui concerne les rayons X, des changements importants sont également en train de s'opérer puisque les sources de lumière actuelles de l'ESRF et Soleil, synchrotrons de troisième génération, vont être améliorées en « *Extremely Brilliant Source* » permettant d'augmenter la brillance et la cohérence des faisceaux de près d'un facteur 100. Ces opérations nécessitent des arrêts de relativement longue durée, ce qui va réduire significativement le temps de faisceau disponible dans les années à venir. Les bénéfices à terme

devraient néanmoins être très importants puisqu'un nouveau champ d'expérience va s'ouvrir, en particulier pour l'imagerie cohérente haute résolution ou les techniques d'XPCS. Les gains en rapport signal/bruit pour certains types d'expériences devraient également être très substantiels, par exemple en réflectivité.

La section 11 souhaite attirer l'attention sur le risque de perte de compétences dans ce domaine fondamental pour la matière molle et soutient les actions menées pour maintenir cette compétence à son haut niveau actuel.

CONCLUSION

La section 11 présente une très grande cohérence quant aux objectifs à atteindre et aux approches mises en œuvre au sein des disciplines et thématiques très diverses qui la composent : chimie macromoléculaire, physique et physico-chimie de la matière molle, interface physique-biologie, matériaux et théories/simulations. En effet, la conception raisonnée, l'élaboration contrôlée, des propriétés et des fonctions originales sont recherchées, quelle que soit l'échelle spatiale. Toutes les

thématiques se sont renouvelées en évoluant vers une augmentation de ce contrôle – que ce soit au niveau de la synthèse des polymères, des procédés de mise en forme ou au niveau des auto-assemblages – et simultanément vers une complexification des systèmes d'études soit par la diversité des constituants et de leurs interactions soit par le changement d'échelle en considérant le confinement nanométrique. Ces changements ne sont possibles que grâce aux développements théoriques, qui produisent des modèles de plus en plus raffinés et qui tiennent compte de cette complexité, et développements expérimentaux qui permettent de sonder la matière molle avec plus de précision.

Les champs disciplinaires de la section 11 sont extrêmement dynamiques et les chercheurs motivés pour relever les défis scientifiques et/ou sociétaux qui les concernent directement comme l'élaboration de matériaux en utilisant des ressources renouvelables et en intégrant dès le départ toutes les questions relatives au cycle de vie. Pour cela toutes les compétences de la section 11 sont nécessaires. Cependant la section s'inquiète du contexte actuel et de la diminution globale des postes qui seront forcément défavorables au maintien de ce large éventail de connaissances actuellement présent au sein de la communauté qui constitue la section 11.

Annexe

Liste des abréviations

CRG : *Collaborating Research Group*

DLVO : Boris Derjaguin, Lev Landau, Evert Verwey et Theodoor Overbeek

ESRF : *European Synchrotron Radiation Facility*

ILL : Institut Laue Langevin

INC : Institut de Chimie

INSB : Institut des Sciences Biologiques

INSIS : Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes

INP : Institut de Physique

ITO : *Indium Tin Oxide* oxyde d'indium-étain

LCST (<i>Lower Critical Solution Temperature</i>): température de solution critique inférieure	ROcP (<i>ring opening copolymerization</i>): copolymérisation par ouverture de cycle
LI : liquide ionique	ROMP : (<i>ring opening metathesis polymerization</i>) polymérisation par ouverture de cycle par métathèse
LLB : Laboratoire Léon Brillouin	ROP (<i>ring opening polymerization</i>): polymérisation par ouverture de cycle
NTC : Nanotube de Carbone	OPV (<i>organic photovoltaic</i>): cellules photovoltaïques organiques
PEBDL et PEHD : polyéthylène de basse densité linéaire et polyéthylène de haute densité	TGIR : Très Grandes Infrastructures de Recherche
PISA (<i>Polymerization-Induced Self-Assembly</i>): auto-assemblage induit par la polymérisation	UCST (<i>upper critical solution temperature</i>): température de solution critique supérieure
PRC : polymérisation radicalaire contrôlée	XPCS : <i>X Photon Correlation Spectroscopy</i>
RGD : tripeptide composé d'arginine, de glycine et d'acide aspartique	
RMN : Résonance Magnétique Nucléaire	

Notes

(1) Selon le bilan social et parité de 2016 consultable sur le site <http://bilansocial.dsi.cnrs.fr/>

(2) 21% des postes de CR ont été attribués à l'interface physique-biologie entre 2010 et 2019.

(3) Les candidatures au concours CR correspondant à l'interface physique-biologie ont représenté 30% des candidatures en section 11 ces trois dernières années (2017-2019)

(4) Quantitativement, il apparaît que des chercheurs de la section 11 de plus de 20 laboratoires différents sont des utilisateurs réguliers, c'est-à-dire qu'ils réalisent au moins une expérience par an sur une TGIR, et que des utilisateurs plus occasionnels appartiennent à d'autres laboratoires de la section. En outre, certains chercheurs de la section 11 sont directement impliqués dans l'accueil d'utilisateurs au sein de ces TGIR et/ou dans le développement d'instruments.

(5) Des chercheurs de la section 11 sont également utilisateurs du réseau TGIR décentralisé RMN Très Hauts Champs (iR-RMN.fr), mais de façon très marginale. Ce réseau est essentiellement utilisé par des chercheurs d'autres sections de l'INC (sections 13, 14, 15 et 16) car les équipements sont essentiellement implantés dans des structures relevant de ces sections.

(6) Les techniques très majoritairement utilisées sont la diffusion aux petits angles, la réflectivité et la diffraction aux petits angles pour les études structurales, déclinées aussi bien avec les neutrons qu'avec des rayons X, et les spectroscopies neutroniques (Temps de Vol, rétrodiffusion, écho de spin) et photoniques (UV-Vis, Infra-Rouge). Du fait de la difficulté de production des neutrons, ces techniques ne sont présentes que dans les TGIR pour la diffusion neutronique. Elles sont par contre relativement répandues pour les rayons X dans les laboratoires sur des appareils ayant des flux inférieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux des synchrotrons, et sont donc très complémentaires de ces derniers.

SECTION 12

ARCHITECTURES MOLÉCULAIRES : SYNTHÈSES, MÉCANISMES ET PROPRIÉTÉS

Composition de la section

Emmanuel MAGNIER (président de section), Armelle OUALI (secrétaire scientifique), Jeanne CRASSOUS (membre du bureau), Karinne MIQUEU (membre du bureau), Jacques LEBRETON (membre du bureau), Carlos AFONSO, Caroline BOUVIER, Laurent CHABAUD, Vincent COEFFARD, Gilles DUJARDIN, Nicolas GIRARD, Sébastien GOEB, Laurence GRIMAUD, Sami LAKHDAR, Kamel MABROUK, Estelle METAY, Guido PINTACUDA, Stéphane QUIDEAU, Frédéric RODRIGUEZ, Christine SALUZZO, Christine THOMASSIGNY.

Résumé

La section 12 du CoNRS intitulée « Architectures moléculaires : synthèses, mécanismes et propriétés » est rattachée à l'Institut de Chimie (INC). Notre section rassemble ainsi les chercheurs dont l'activité principale relève de l'innovation en a) synthèse moléculaire, de la méthodologie de synthèse à la synthèse de molécules complexes ; b) chimie supra-moléculaire ; c) matériaux moléculaires ; sans oublier les d) outils physico-chimiques et analytiques indispensables à la caractérisation de la structure des objets moléculaires et de leurs propriétés ainsi que la modélisation moléculaire. Ces thématiques sont détaillées dans la suite de ce document.

Introduction

La section 12 est sans doute la section de cœur de l'Institut de Chimie. En effet, une très grande majorité des chercheurs de notre section sont affectés à des laboratoires de l'INC en raison de leurs thématiques centrées sur la chimie moléculaire. Néanmoins, la section ne se contente pas, loin s'en faut, de préparer de nouvelles molécules organiques mais montre avec beaucoup de succès leur utilité dans les domaines des matériaux et des sciences du vivant. Les forces de notre section trouvent leur source dans une expertise unique et précieuse dans tous les aspects moléculaires de la

chimie. Les architectures organiques sont les fondations de très nombreuses chimies (bien au-delà de la section 12), ainsi que les briques essentielles à la construction d'édifices plus complexes. Les opportunités sont croissantes tant les besoins de molécules inédites augmentent, ainsi que les capacités et les compétences qui nous amènent de plus en plus vers les autres champs disciplinaires. Les faiblesses qui nuisent au travail de la section 12 sont un recrutement bien trop limité et qui est loin d'être compensé par les départs en retraite. Ces effectifs trop peu fournis sont une des menaces de notre discipline à laquelle s'ajoutent deux autres points qui accentuent notre vulnérabilité : le manque de soutien de nos partenaires industriels et une très forte compétitivité internationale notamment de la part des nombreux laboratoires qui bénéficient de crédits sans commune mesure avec les nôtres. Cette remarque met également en lumière la plus grande difficulté de nos chercheurs à répondre à des appels à projets bien (trop) souvent à caractère interdisciplinaire. Les pages suivantes de ce rapport montrent que cet aspect est loin d'être négligé dans notre communauté mais il convient aussi d'affirmer l'importance de pouvoir développer des projets centrés sur notre cœur de métier et déconnectés d'une application directe ou trop évidente.

Jamais le besoin d'innovation n'a été aussi pressant qu'il soit dans le domaine de la méthodologie et des cibles à atteindre. L'exploitation du tableau périodique conduit à toujours repousser les limites des composés que l'on peut préparer et cela dans les deux dimensions a) celle des petites molécules très fonctionnalisées pour lesquelles un vaste champ de découverte reste en friche ; ces cibles sont en réalité bien souvent de réels défis très complexes, b) celle des molécules à haut poids moléculaire dont la préparation multi-étapes doit être améliorée. Pour atteindre ces objectifs, élaborer de nouvelles structures mais aussi améliorer les procédés actuels dans un souci de respect des contraintes environnementales, la chimie moléculaire doit constamment se réinventer. Et elle se réinvente chaque jour. Qui aurait imaginé il y a peu, associer radicaux organiques et métaux, réaliser des réactions

dans de petites tubulures, que l'électrosynthèse allait connaître une nouvelle jeunesse ?

La section 12 porte la connaissance, l'expertise et l'innovation moléculaire et se place ainsi au centre de la chimie moderne.

Les principales avancées des années récentes sont résumées dans les pages suivantes.

I. Méthodologie de synthèse

A. Nouvelles réactions / nouveaux modes d'activation et de contrôle régio-, chimio-, stéréo-sélectifs

La découverte, fortuite ou raisonnée, de nouvelles réactions a rythmé l'évolution de la chimie organique tout au long de son histoire. L'enrichissement mutuel de la synthèse de molécules complexes et des recherches menées en méthodologie est un facteur indéniable d'innovation pour ces deux axes constituant le cœur de métier du chimiste de synthèse. Ainsi, le développement de nouveaux concepts étend le panel de stratégies mis à la disposition des chimistes pour planifier l'accès à des cibles complexes tandis que les potentiels échecs en synthèse totale requièrent de trouver de nouvelles méthodologies pour contourner les difficultés. Au regard de la complexité croissante des molécules visées et des nombreux paramètres à prendre en compte dans l'élaboration d'une stratégie de synthèse, la méthodologie en chimie organique reste un axe de recherche florissant au sein du paysage scientifique français. Les principales avancées dans ce domaine peuvent être abordées en prenant chacun des éléments d'une réaction : les substrats et produits, la nature des transformations et les conditions réactionnelles.

La Nature est une formidable source d'inspiration pour les chimistes de synthèse tant sur les substances naturelles produites que les stratégies qu'elle déploie pour y accéder (approche bio-inspirée ou biomimétique). La valorisation de substrats déjà fonctionnalisés issus de la biomasse en produits complexes apparaît être une stratégie particulièrement pertinente, par sa parfaite adéquation avec les principes de la chimie verte et l'attente du monde industriel pour la valorisation de certains déchets. Les travaux visant à la mise au point de nouveaux réactifs revêtent également un intérêt particulier pour offrir de nouvelles opportunités aux chimistes de synthèse.

En synthèse de molécules complexes, les méthodologies doivent notamment intégrer des paramètres d'efficacité, de sélectivité (chimio-, régio- et stéréo-), de coût, et d'impact sur l'environnement. La découverte de méthodes efficaces et sélectives, notamment chimio-sélectives, basées sur de la catalyse métallique, l'organocatalyse ou la biocatalyse, reste un défi permanent auquel de nombreuses équipes de recherche en France s'intéressent. Les travaux portant notamment sur l'association de différents systèmes catalytiques au sein d'un même réacteur ont permis de lever des verrous importants tant en terme de réactivité, de sélectivité, de même que l'activation sélective de liaisons C-H, C-C ou C-Hétéroatomes au sein d'architectures moléculaires. Des trésors d'ingéniosité, tant sur les cibles que sur les outils mis au point, ont été déployés pour réaliser ces transformations sur des molécules regorgeant de sites fonctionnels potentiellement activables. Ces efforts sont notamment motivés par la perspective de voir émerger de nouveaux paradigmes en synthèse organique qui révolutionneraient la discipline tant en recherche fondamentale qu'appliquée.

Concernant le contrôle de la stéréosélectivité et notamment de l'énantiosélectivité, la catalyse asymétrique reste un domaine de recherche prospère. Les travaux portent notamment sur le design de ligands chiraux permettant un meilleur transfert de chiralité lors de transformations métallocatalysées ou la conception de nouveaux systèmes organo-

catalytiques chiraux. Actuellement, la mise au point de procédés catalytiques asymétriques reste principalement basée sur un criblage minutieux et chronophage des conditions réactionnelles (catalyseur, solvant, température, additifs...). L'explosion de l'intelligence artificielle dans les sciences, et en particulier en chimie, devrait faciliter la mise au point de nouvelles réactions dans un futur proche.

Parmi les outils disponibles pour le développement de nouvelles méthodologies, les sources d'activation non conventionnelles – microondes, ultrasons, mécano-chimie – offrent des perspectives enthousiasmantes dans l'amélioration des réactions existantes et dans l'émergence de nouvelles réactivités. Ces dernières années, la chimie en flux continu, la photochimie ou l'électrochimie ont également pris une part importante dans la mise au point de nouvelles méthodologies et les travaux aux interfaces avec d'autres disciplines (informatique, génie des procédés, biochimie...) émergent comme des solutions innovantes pour répondre aux défis futurs de la méthodologie de synthèse.

B. Catalyses

1. Organocatalyse

Depuis son grand essor à partir des années 2000, l'organocatalyse asymétrique reste l'un des grands thèmes de recherche de la synthèse organique, même si le nombre de publications annuel semble se stabiliser.

Cette méthode de catalyse par de petites molécules organiques reste très attractive de par la toxicité limitée, le faible coût et la stabilité des catalyseurs généralement utilisés (catalyse complémentaire). Elle a de plus permis de résoudre des approches énantiosélectives qui restaient complexes à obtenir de manière plus « classique ». L'étude des mécanismes d'action des organocatalyseurs, par des approches couplées expérience-théorie, a permis l'évolution des systèmes et la création de nouveaux modes

de catalyse. Une classification selon le mode d'activation du substrat par le catalyseur permet de distinguer deux grands procédés dépendant de la formation d'intermédiaires covalents ou non-covalents. Ainsi, la première catégorie regroupe les réactions impliquant la formation d'énamines ou d'ions iminiums pour les plus connues, et auxquelles s'ajoutent les catalyseurs de type carbène N-hétérocycliques (NHC), phosphines, ammonium, radicalaires. Les interactions non covalentes englobent les catalyses par hydrogènes, acide de Bronsted, transfert de phase, ou encore anion chiral. Il est à noter qu'un unique catalyseur peut agir selon divers modes d'activation (catalyseur multifonctionnel).

Les catalyses par amines ou activation par liaisons hydrogènes restent encore aujourd'hui les méthodes les plus étudiées, avec des systèmes pouvant contrôler l'énantiosélectivité d'un nombre important de centres asymétriques nouvellement formés. Mais d'autres molécules se révèlent très prometteuses, à l'image des phosphines dont l'utilisation en catalyse permet l'obtention de squelettes carbo- et hétérocycliques. Cette méthode consiste en l'addition d'une phosphine nucléophile sur un substrat électrophile, généralement sous conditions douces, induisant la formation d'un intermédiaire zwitterionique réactif. En particulier, cette méthode allège les réactions traditionnellement connues pour générer des oxydes de phosphines par quantités stoechiométriques (notamment réactions de Wittig, Mitsunobu, Staudinger). L'utilisation des phosphines en version catalytique recouvre déjà un grand nombre de réactions. La découverte de nouvelles voies d'utilisation va certainement faire de ces catalyseurs l'un des procédés incontournables de l'organocatalyse. La famille des catalyseurs s'est élargie avec des structures de type catalyseurs supramoléculaires, liquides ioniques ou encore catalyseurs supportés.

L'organocatalyse est maintenant devenue un outil privilégié pour des stratégies efficaces et plus propres pour l'environnement lors de synthèse de produits naturels et pharmaceutiques. L'association plus récente avec de nouveaux modes d'activation (micro-ondes,

chimie de flux, activation sous pression...) devrait fournir de nouvelles réactivités et permettre l'obtention de cibles toujours plus ambitieuses.

2. Catalyse organométallique dont métaux non nobles

La chimie organométallique continue sa marche en avant initiée au milieu du siècle dernier. Au niveau du système catalytique à proprement parler, la rationalisation de la nature des espèces organométalliques et l'utilisation de complexes organométalliques bien définis sont essentielles. A ce titre, des laboratoires de recherches français ont soit caractérisé de nouvelles espèces qu'ils ont engagées avec succès dans des transformations inédites, ou encore défini les espèces mises en jeu pour améliorer des réactions métallo-catalysées. Les développements effectués ces dernières années autour des ligands associés au métal ont connu un réel essor. La synergie entre ces deux partenaires a encore été repoussée. Le ligand ne se contente plus de jouer sa partition classique au niveau électronique et stérique, mais il devient non-innocent, hémi-labile ou encore confinant. Tous ces développements, d'une haute importance conceptuelle, devront se concrétiser par la mise au point de ligands efficaces et facilement synthétisables pour être utilisés largement.

L'incorporation de ces systèmes organométalliques dans des processus chimiques de plus en plus aboutis constitue toujours un enjeu majeur. Deux voies principales sont actuellement explorées. D'une part, la modification catalytique de liaisons peu ou très peu réactives de façon sélective au départ de substrats extrêmement simples demande l'élaboration d'édifices catalytiques bien pensés. D'autre part, la conception d'un système catalytique pouvant réagir sélectivement sur un substrat facile d'accès et hautement fonctionnalisé est également un axe privilégié. Ces deux concepts ont un objectif commun qui est l'augmentation de la complexité des structures moléculaires formées. D'autres voies comme

les réactions tandem, multi-composantes ou encore domino, toutes métallo-catalysées, permettent également de l'atteindre. Ces différentes avancées sont souvent combinées au développement de systèmes catalytiques chimiques pour la synthèse de molécules à haute valeur ajoutée. De plus, des systèmes efficaces associant plusieurs catalyseurs organométalliques voient de plus en plus le jour. En effet, la catalyse dite duale ou coopérative connaît un essor très important et elle devrait permettre de repousser certaines limites inhérentes à l'utilisation d'un seul métal de transition.

La prise en compte des aspects environnementaux est maintenant devenue incontournable dès l'initiation d'un nouveau projet. Bien évidemment, la recherche en chimie organométallique n'y échappe pas et se doit même d'apporter des solutions viables dans la transformation et la production de molécules d'intérêt. Ainsi, les nouveaux systèmes catalytiques sont de plus en plus efficaces (TON et TOF) et possèdent une importante stabilité ce qui permet leur utilisation avec une très faible charge catalytique. Le recyclage est également un point important à prendre en compte, surtout lors de l'utilisation de métaux non nobles, très coûteux et potentiellement toxiques. Ainsi, le développement notable, depuis ses dernières années, autour de l'utilisation de métaux non nobles pour réaliser des transformations inédites ou réservées jusqu'ici aux métaux nobles, apparaît comme l'une des solutions d'avenir.

3. Biocatalyse

L'année 2018 a été l'année de la consécration d'un pan de la recherche sur la biotechnologie et la biocatalyse *via* le prix Nobel de chimie décerné conjointement à Frances Arnold, George Smith et Sir Gregory Winter. C'est à Frances Arnold, cinquième femme à recevoir un prix Nobel, que l'on doit les travaux sur l'évolution dirigée dite aussi évolution orientée des enzymes, permettant d'accélérer les réactions chimiques. Quant à George Smith et Sir Gregory Winter, ils ont respectivement

mis au point la technique « phage display des peptides et des anticorps » (des virus infectent une bactérie, la piègent afin de la reproduire) et son association à l'évolution orientée. Ces composés qui sont des anticorps modifiés, ont donné naissance à la phagothérapie.

Habituellement mis au sein des cellules, les enzymes et les microorganismes catalysent des transformations. Ces catalyseurs issus du vivant tout comme les catalyseurs organométalliques peuvent améliorer des synthèses existantes, conduire à des transformations éventuellement peu courantes voire impossibles en chimie conventionnelle, et permettre un accès rapide et efficace à de nouveaux produits et composés d'intérêts. Néanmoins, contrairement à la chimie organométallique, la biocatalyse n'utilise pas de métaux lourds, précieux, elle est donc plus respectueuse de l'environnement ce qui en fait un outil incontournable de la chimie verte. Les avancées de la biocatalyse découlent directement de l'évolution dirigée des enzymes. Cette évolution consiste à créer une diversité génétique en sélectionnant plusieurs gènes et en accumulant les mutations avantageuses en exaltant, par exemple, une fonction minoritaire de l'enzyme de départ. Les caractéristiques de ces nouvelles espèces sont par la suite déterminées par criblage haut débit dont les tests doivent au mieux refléter les activités enzymatiques recherchées. Ces modifications permettent à ces nouvelles enzymes de les rendre plus stables, plus actives, plus sélectives donc plus efficaces. Récemment, leur champ d'action a notamment pu être élargi à des environnements inhabituels afin de les adapter au mieux aux exigences industrielles à savoir l'emploi d'un solvant organique nécessaire à la solubilisation des substrats organiques, d'un pH plus acide ou basique, de températures élevées (enzymes issues d'organismes extrémophiles)

La biocatalyse est actuellement présente dans de nombreux domaines de l'industrie, tels les cosmétiques, le secteur des lessives et détergents, l'agroalimentaire, la pharmaceutique, la chimie fine, les biocarburants, le papier, le textile.

À l'heure actuelle, seuls 15% des processus utilisent des bioconversions enzymatiques et leur utilisation ne cesse de progresser du fait des conditions plus modérées et plus « vertes » par rapport aux procédés chimiques habituellement mis en œuvre et de matières premières souvent issues de la biomasse

Bien que de nombreux progrès aient été réalisés dans le domaine de la biocatalyse, l'immobilisation sur support de l'enzyme pour des processus en continu reste l'un des défis majeurs pour une utilisation industrielle. De nombreuses méthodes d'immobilisation font l'objet de travaux mais peu d'entre elles ont été transposées pour une utilisation industrielle pour des raisons de coût du support et de mise en œuvre. Seule l'absorption d'enzymes sur des supports échangeurs d'ion fait exception. Dans une moindre mesure, l'amélioration des performances globales des systèmes biologiques est, elle aussi à considérer.

Pour conclure, les perspectives de la biocatalyse sont nombreuses et ce, dans tous les domaines. Cependant, du fait des enjeux économiques et sociétaux, ce sera sans doute dans les secteurs de l'énergie (formations de biocarburants, production d'hydrogène...), la valorisation des déchets et du dioxyde de carbone que les progrès devraient être les plus marquants.

4. Catalyse de polymérisation

Si les polymères naturels, bois, fibres végétales, cuir, laine, ont été les premiers utilisés, les polymères synthétiques sont aujourd'hui très présents dans notre quotidien et leur demande est croissante. En effet, de nombreux domaines d'activités sont concernés tels que l'électronique, l'énergie, le magnétisme, la photonique, la chimie supportée et miniaturisée, l'imagerie biologique, la médecine ou le développement durable. Le développement de méthodes de synthèse de nouveaux polymères nanostructurés ou polyfonctionnels a permis l'accès à des matériaux pour de nouvelles applications ou encore pour de meilleures performances. Il est ainsi important d'être en mesure de contrôler la structure chimique, l'architecture et la localisa-

tion des groupements réactifs/fonctionnels permettant de conférer une fonction au polymère/matériau. Des avancées majeures ont été réalisées grâce à la mise au point de nouveaux catalyseurs et amorceurs, de nouvelles méthodes (polymérisation contrôlée, photopolymérisation) et de nouveaux monomères pour les différentes techniques de polymérisation. Le développement des matières plastiques d'origine synthétique et leurs exploitations intensives pour des usages courants, se sont traduits par l'accumulation dans l'environnement de déchets non biodégradables à durée de vie très longue. Afin de répondre à cette problématique, la synthèse contrôlée de polymères biodégradables est mise au point dans différentes équipes de recherche. Une autre alternative est à l'étude et consiste à incorporer des polymères naturels dans des matériaux synthétiques en utilisant un compatibilisant. Il est important de poursuivre ces innovations en tenant compte des critères de recyclabilité, de fonctionnalité, de biodégradabilité, des bio-ressources et d'un coût contrôlé, afin de répondre à la demande en matériaux polymères plus performants qui ne cesse de croître (matériaux polyfonctionnels, recyclables, auto-réparants, nano-structurés, hybrides).

5. Multicatalyse

Apparue depuis une vingtaine d'années, la catalyse duale associe différents modes de catalyse complémentaires. Elle permet de concevoir, d'observer des transformations chimiques difficiles voire impossible à réaliser selon des méthodes conventionnelles. La réduction des déchets, du temps de réaction, la possibilité de former et de contrôler des intermédiaires instables en font un outil indispensable de formation de cibles possédant une structure complexe. Elle permet de plus un excellent contrôle de la régio-, chimio- et stéréo- sélectivité en synthèse organique. Il est à noter que le concept de stéréo-divergence en catalyse duale (accès à chacun des stéréoisomères d'un composé à partir des mêmes synthons) devrait conduire à des systèmes toujours plus efficaces *via* une étude mécanistique poussée des processus asymétriques.

Jusqu'à une période relativement récente, la catalyse duale consistait principalement en l'utilisation de deux types de systèmes catalytiques identiques ou différents parmi la métallo-catalyse, l'organocatalyse et la biocatalyse. En ce qui concerne la biocatalyse, des réactions en cascade tendent à se développer *via* l'utilisation combinée de plusieurs enzymes, l'un des défis étant de mettre au point des cascades comportant plus de 3 étapes.

Depuis peu, la photocatalyse a pris une part importante dans la multi-catalyse. Ceci est dû à son mode d'action particulier, à savoir la capacité d'absorber et de convertir l'énergie d'un photon pour effectuer une réaction. Elle ne nécessite pas d'interactions fortes avec le substrat, contrairement aux autres modes de catalyse. Les divers types de mécanismes entrant en jeu en photocatalyse sont le transfert électronique, le transfert énergétique et le transfert d'hydrogène. Il est à noter qu'en catalyse duale, ils sont combinés à l'action de médiateurs rédox (photosensibilisateurs) ou de co-catalyseurs compatibles de type acide Bronsted ou Lewis, des organocatalyseurs, des catalyseurs organométalliques à base de Ni, Ru, Ir, Au, Cu pour les plus courants.

Un autre couplage plus récent est celui de la photocatalyse avec la biocatalyse. La grande diversité des enzymes redox associées avec l'excellente activité catalytique par site actifs le rendent très attrayant. Cependant, cette méthode en est encore à ses balbutiements et souffre d'un manque d'études notamment en ce qui concerne la stabilité des biocatalyseurs en synthèse photo-enzymatique. Cette stabilité pourrait être améliorée par immobilisation ou encapsulation du biocatalyseur. La résolution de ce problème primordial devrait permettre un transfert à l'échelle industrielle et laisser présager un avenir prometteur pour la catalyse photo-enzymatique.

6. Chimie radicalaire

Les réactions mettant en jeu des espèces radicalaires font partie des outils indispensables en synthèse organique. Cependant, ces

processus ont longtemps souffert de l'utilisation de réactifs toxiques tels que les organostannanes, et ce malgré de nombreux efforts pour bannir leurs usages. Récemment, la chimie radicalaire a malgré tout connu un nouvel engouement, notamment *via* la catalyse photoredox et l'électrosynthèse. Bien que connus depuis de nombreuses années, la prise de conscience de la communauté scientifique pour les enjeux environnementaux a conduit les chercheurs à s'intéresser à ces techniques pour générer des espèces radicalaires (radical, radical-cation ou radical-anion) par des procédés plus éco-compatibles.

La catalyse photoredox exploite les propriétés photophysiques et électrochimiques de complexes organométalliques ou de colorants organiques pour *in fine* convertir des photons en espèce radicalaire réactive. Elle est devenue un outil important en synthèse organique et connaît de nombreuses évolutions. La synthèse de nouveaux catalyseurs permet de moduler les longueurs d'onde d'absorbance des catalyseurs et d'élargir leurs champs d'applications. Le couplage avec la synthèse en flux continu permet la montée en échelle de ces réactions. Comme indiqué précédemment dans le contexte des catalyses duales, la catalyse photoredox est souvent combinée avec d'autres modes d'activation comme la catalyse organométallique, catalyse enzymatique ou organocatalyse. Cela ouvre de nouvelles perspectives en synthèse organique pour la construction d'architectures moléculaires complexes.

Conceptuellement proche de la catalyse photoredox, l'électrosynthèse organique a également connu un regain d'intérêt. En effet, des développements technologiques récents ont permis de rendre cette technique populaire et conviviale. Elle est devenue une alternative à l'utilisation d'oxydants ou réducteurs chimiques et le contrôle du potentiel ou du courant au cours du processus permet un contrôle fin de la sélectivité de la réaction. De la même manière, elle peut être couplée à d'autres modes d'activation (catalyse organométallique par exemple) ou à des techniques comme la chimie en flux. Les conditions douces dévelop-

pées associées à la mise en œuvre aisée permettent d'envisager des applications en chimie pharmaceutique.

Ces outils synthétiques ont montré leurs efficacités dans de nombreuses transformations nécessitant la création de liaison carbone-carbone ou carbone-hétéroatome (azote, halogène, oxygène, bore...). Ainsi, le champ des applications est extrêmement large allant de la fonctionnalisation d'hétérocycles ou de molécules complexes (sucres...) à des réactions radicalaires de transfert d'atomes ou de fonctionnalisation sélective de liaisons C-H.

7. Biomasse

Jusqu'au XIX^e siècle, les matières premières renouvelables étaient largement utilisées comme par exemple les graisses et les huiles végétales dans la fabrication de peintures, de vernis, de bougies et de savons. C'est à partir de la seconde Guerre mondiale que l'industrie pétrochimique s'est développée rapidement en transformant le pétrole et le gaz en médicaments et autres produits de commodité. Depuis quelques années, une renaissance de la « xylochimie » valorisant tous les constituants du bois est observée. Le bois, composé organique, est constitué de 50 % de carbone, 44 % d'oxygène et 6 % d'hydrogène répartis en 3 constituants macromoléculaires majoritaires : la cellulose 45 %, l'hémicelluloses 25 % et la lignine 25 %. Selon les essences, des substances de faible poids moléculaire peuvent être valorisées comme par exemple les tannins du chêne, la gomme ou résine du pin maritime, le latex de l'Hévéa, le xylitol du bouleau... La fragmentation de la lignine selon les conditions (réduction, oxydation, hydrolyse...) peut également conduire à différents composés valorisables et notamment des dérivés aromatiques. De nombreuses plateformes moléculaires peuvent être synthétisées par biotransformation à partir des glucides. À titre d'exemple, l'éthanol est aujourd'hui produit industriellement par fermentation du glucose. Par transformation chimique, l'accès à de nombreuses plateformes moléculaires comme celles des dérivés furanes

aromatiques ou saturés de la famille des tétrahydrofuranes est rendu possible. Les terpènes représentent une autre famille de molécules d'intérêt que l'on retrouve dans des résineux ou encore dans certaines plantes. Les produits réduits peuvent trouver des applications en tant que solvants par exemple. Parmi les autres matières premières renouvelables, les huiles végétales ont beaucoup inspiré les chercheurs ces dernières années. Des alternatives à l'utilisation des huiles végétales comme source d'énergie sont proposées. Peuvent être citées, la préparation par une coupure oxydante de monomères diacides et de l'acide pelargonique actuellement utilisés comme herbicides, la mise au point de systèmes catalytiques très performants pour effectuer la métathèse de dérivés insaturés, la synthèse de solvants, hydrotropes et surfactants à partir de glycérol et de ses dérivés. La culture des micro-algues représente une alternative à celle des plantes aériennes. Et par exemple, les déchets de micro-algues sont aujourd'hui valorisés pour la préparation de bio-bitumes. La valorisation des rejets, des déchets de l'industrie ou encore la remédiation des sols est aussi une préoccupation importante. Principal gaz à effet de serre produit par l'activité humaine, le taux de CO₂ dans l'atmosphère augmente régulièrement et notamment de 30 % au cours des deux derniers siècles. Des travaux importants sont engagés pour capter et stocker le CO₂. Pour compléter la filière, il est valorisé en le considérant comme une matière première source de carbone non fossile utilisable pour la production de produits à plus forte valeur ajoutée, comme les produits chimiques (acide formique, méthanol, méthane, carbonates...). La dépollution des sols à l'aide de plantes bien identifiées permet la préparation de catalyseurs enrichis en différents métaux selon la nature de la plante sélectionnée. Ces catalyseurs sont employés pour effectuer différentes transformations chimiques. La valorisation des plantes invasives est également au cœur de programmes de recherche. Ces dernières années des molécules bio-sourcées ont également été produites par biosynthèse. Quelle place va prendre ce nouvel outil dans la boîte du chimiste ?

8. Activation de petites molécules (CO₂, N₂)

L'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère est une composante importante du réchauffement planétaire et responsable en grande partie des changements climatiques actuels et à venir. L'utilisation des énergies fossiles, grande productrice de ce gaz à effet de serre, doit rapidement être substituée par d'autres sources énergétiques. De plus, la raréfaction des sources d'énergie fossile rend vital ce changement de paradigme pour nos sociétés modernes très énergivores. Une des possibilités, actuellement très développée, est d'utiliser les petites molécules en tant que centre de stockage, mais également comme source abondante, d'énergie. Ainsi, divers laboratoires français sont partie prenante dans l'activation de petites molécules que ce soit électrochimiquement, par catalyse métallique ou encore par organo-catalyse. Les petites molécules organiques disponibles en grande quantité ont comme inconvénient leur très grande stabilité et sont donc difficilement transformables. Il est donc toujours utile de découvrir de nouveaux chemins réactionnels permettant d'accélérer les cinétiques de réaction.

C. Hétérochimie/Hétéroéléments (F, Si, B, P, S, Se, N...)

Cette chimie extrêmement riche et innovante pourrait faire l'objet d'une partie distincte. Elle serait alors non exhaustive (faute de place) et en forte redondance avec les autres chapitres tant les hétéroatomes sont présents dans tous les champs disciplinaires de la section. En effet, l'incorporation d'hétéroéléments permet d'accéder à des molécules très originales avec des propriétés inattendues (catalyse, nouvelles structures stables, espèces à coordinence inusuelle...) et ainsi l'innovation dans ce domaine des hétéroéléments se retrouve dans tous les autres chapitres.

D. Milieux et activation

La mise au point de procédés plus efficaces et sélectifs est un enjeu majeur en chimie organique, qui est au cœur du développement de nouveaux milieux réactionnels et méthodes d'activation. Ces recherches s'inscrivent dans une démarche de chimie éco-compatible et durable, avec comme objectifs de limiter les effluents polluants, la dangerosité des procédés et d'améliorer leur efficacité énergétique.

L'une des solutions pour répondre à ces enjeux s'appuie sur le développement d'alternatives aux solvants organiques traditionnels. Dans ce domaine, des efforts sont entrepris pour utiliser des solvants « verts » ou biosourcés (glycérol et ses dérivés, les dialkylcarbonates, la γ -valérolactone), pour réaliser des réactions dans l'eau (pure ou via des microémulsions) voire sans solvant. Par ailleurs, l'utilisation des fluides supercritiques ou les solvants eutectiques profonds permettent quant à eux la réduction de déchets et le recyclage. Leurs propriétés particulières leur confèrent également un intérêt particulier dans les techniques de séparations (SFC...). En outre, on observe un regain d'intérêt pour les solvants fluorés tels que les alcools fluoroalkyles (TFE, HFIP), dont les propriétés intrinsèques (acidité, polarité, liaison H...) permettent de réaliser des transformations sans promoteurs extérieurs, ou des réactions métallo-catalysées de façon plus efficaces et sélectives.

L'amélioration des procédés de synthèse passe aussi par le développement de technologies innovantes d'activation. Ces outils apportent des solutions aux problématiques liées à la chimie durable, mais aussi à la réactivité moléculaire. Ces techniques ont connu une croissance importante grâce à la commercialisation d'appareillages pratiques et sûrs. Parmi ces méthodes d'activation, citons les micro-ondes, les hautes pressions, les radiofréquences, la sonochimie, la photochimie ou l'électrochimie. Bien que plus spécifique, la mécanochimie permet d'accéder à des biomolécules ou de réaliser des réactions d'activation C-H, tout en limitant l'utilisation de solvants.

La technique de la synthèse en flux continu a bénéficié d'importantes avancées scientifiques. Les dispositifs microfluidiques (échelle du laboratoire de synthèse), millifluidiques (montée en échelle) ou nanofluidiques (échelle analytique) sont couramment utilisés dans les laboratoires de recherches académiques et industriels car ils permettent notamment de diminuer la dangerosité des procédés et d'optimiser les processus en batch. La chimie en flux continu voit aujourd'hui son champ d'application élargi grâce à la combinaison de cette technique à différents modes d'activation (micro-onde, photochimie, électrochimie...). Les techniques d'analyse en continu (RMN, IR...) associées au « machine learning », offrent des applications intéressantes en synthèse organique sans la nécessité d'une intervention humaine. Enfin, notons que l'impression 3D fait son apparition dans les laboratoires de recherche pour la fabrication sur mesure de micro-réacteurs.

II. Synthèse de molécules complexes

La synthèse chimique de molécules complexes et en particulier la synthèse totale de substances naturelles (très souvent bioactives) est une activité de recherche très active. Les activités connexes de méthodologies de synthèse en vue d'applications en synthèse totale/multi-étape concernent une communauté élargie. L'enrichissement mutuel de la synthèse totale de molécules complexes et des recherches menées en méthodologie est un facteur d'innovation indéniable pour ces deux axes constituant le cœur de métier du chimiste de synthèse. Ainsi, le développement de nouveaux concepts étend le panel de stratégies mis à la disposition des chimistes pour planifier l'accès à des cibles de complexité structurale croissante tandis que les potentiels échecs en synthèse totale requièrent de trouver de nouvelles méthodologies pour contourner

les difficultés. Elles doivent notamment intégrer des paramètres d'efficacité, de sélectivité, d'impact sur l'environnement et de coût. La découverte de méthodes efficaces et sélectives, notamment chimiosélectives, basées sur l'activation de liaisons C–H, ou C–C, sur la catalyse métallique propre, l'organocatalyse ou la biocatalyse, voire leur association, et/ou sur des modes d'activation durables (e.g., photochimie, électrochimie) rend possible la mise en œuvre de nouvelles stratégies de synthèse. Leur choix et la mise en œuvre des tactiques méthodologiques correspondantes d'accès aux molécules ciblées peuvent aisément tirer profit de l'aide apportée par les progrès réalisés en chimie théorique. La chimie computationnelle permet de modéliser les structures géométriques, électroniques et les dynamiques intra- et intermoléculaires de systèmes organiques de plus en plus complexes ainsi que de décrire des mécanismes réactionnels. Elle permet également de rationaliser des données expérimentales telles que des régio/chimio/stéréosélectivités, voire même aujourd'hui de les anticiper.

Ainsi, dans l'avenir, l'analyse rétrosynthétique *in silico* pourra constituer un outil formidable pour la synthèse chimique de molécules complexes. L'émergence de nouveaux outils informatiques dotés des algorithmes de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage machine (« machine learning ») serviront les (bio)chimistes organiciens dans leurs choix de molécules cibles, d'origine naturelle ou non, et dans leurs efforts de préparation de ces molécules, de leurs analogues et dérivés. Les approches modernes d'accès chimique à la diversité moléculaire (e.g., diversity-oriented synthesis, biology-oriented synthesis, fragment-based drug discovery, natural products post-fonctionalization), sont aussi autant d'outils encore à développer avec l'aide de l'intelligence artificielle pour améliorer les sélectivités d'accès (*i.e.*, chimio-, régio- et stéréosélectivités) et, *ipso facto*, la valorisation des molécules issues de la synthèse et de l'hémisynthèse (bio)chimiques dans d'autres disciplines scientifiques et domaines d'intérêt pour les industries (*vide infra*).

En amont de ces nouvelles opportunités offertes par l'outil informatique moderne, n'oublions pas que la nature est et demeure une formidable source d'inspiration pour les chimistes de synthèse tant sur la diversité des substances naturelles produites, en termes de structures et de propriétés biophysico-chimiques, que sur les stratégies que la nature déploie pour y accéder. Par conséquent, la conception de voies de synthèse bio-inspirées ou biomimétiques continue de constituer un défi des plus louables en synthèse organique, riche d'enseignements pour la biochimie et de découvertes en synthèse organique d'avantage basées sur l'exploitation de la réactivité intrinsèque des molécules que sur le recours à la chimie de protection pour forcer leur synthèse. Aussi, la valorisation de molécules déjà fonctionnalisées issues de la biomasse en produits plus complexes et actifs apparaît être une approche particulièrement pertinente, car cette approche est aussi en adéquation avec les principes de la chimie durable, dite « verte », et l'attente des industries pour la valorisation de leurs produits, et sous-produits qualifiés de déchets.

Par ailleurs et de toute évidence, la synthèse chimique de molécules complexes, et en particulier la synthèse totale de substances naturelles et de dérivés, continuent de constituer le maillon central de la formation avancée en chimie organique. Le maintien d'une recherche de haut niveau est nécessaire pour accéder par la synthèse chimique à des molécules de plus en plus complexes, aux propriétés diverses et variées.

Au-delà des aspects disciplinaires, les liens de la synthèse chimique de molécules complexes avec d'autres domaines scientifiques sont nombreux, et aussi croissants en raison des développements modernes transdisciplinaires de la recherche scientifique. Au sommet de la liste demeurent encore certainement les liens avec la chimie thérapeutique et la biologie. Un projet de synthèse totale d'une substance bioactive, en plus de la possibilité de fournir en quantité suffisante cette substance quand elle est naturellement peu abondante, peut aussi permettre l'accès à des congénères, à des analogues non naturels, ainsi qu'à des variants isotopiquement marqués. Ces derniers s'avèrent très utiles

pour les études de relation entre structure et activité, d'élucidation des modes d'action, et du métabolisme moléculaire *in vivo*.

L'avènement récent de la chémobiologie ouvre aussi de nouvelles opportunités aux chimistes organiciens pour exploiter encore plus en avant leurs compétences en franchissant les barrières des domaines de la biologie. Ainsi, par exemple, l'élaboration de sondes moléculaires équipées des produits de la synthèse chimique conjugués à des motifs de visualisation ou capables d'interactions moléculaires particulières, offre aujourd'hui des outils indispensables à la compréhension des processus biologiques fondamentaux et à l'identification des cibles biomoléculaires d'intérêt pour l'industrie pharmaceutique.

Une synthèse totale, si elle est bio-inspirée, peut aussi permettre de confirmer ou d'infirmer des voies de biosynthèse de métabolites spécialisés. Ces éléments de compréhension de la diversité moléculaire, ainsi accessibles grâce à la synthèse chimique, sont autant d'informations vers une compréhension véritable de la biodiversité des organismes. Ces connaissances fondamentales sont cruciales pour tout développement biotechnologique de production de molécules d'intérêt par la biologie de synthèse.

La synthèse chimique constitue aussi un champ de compétences indispensables à bien d'autres domaines scientifiques liés à diverses industries comme celles de l'agroalimentaire, de la parfumerie et des cosmétiques, ou même de la parapharmacie. L'accès à certains principes actifs ou additifs naturels traditionnellement obtenus par extraction, comme certains ingrédients odorants, colorants, anti-oxydants, doit aujourd'hui faire face à des législations de plus en plus strictes qui contraignent à raison l'exploitation des ressources naturelles. La synthèse chimique reste donc une alternative et même un moyen efficace d'accès à des molécules dont les propriétés et l'innocuité peuvent être grandement améliorées.

Rappelons que les produits de la recherche en synthèse chimique alimentent les collections d'échantillons regoupés au sein de la Chimio-

thèque Nationale dont l'objectif est d'en promouvoir la valorisation scientifique *via* l'évaluation biologique, avec un mode d'organisation récemment renouvelé dans le cadre d'un partenariat entre le CNRS, l'industrie pharmaceutique française et les laboratoires concernés.

III. Chimie Supramoléculaire

Reposant sur des interactions faibles non covalentes, la chimie supramoléculaire a été consacrée en 1987 par l'attribution du prix Nobel à Donald J. Cram, Jean-Marie Lehn et Charles Pedersen pour leurs travaux sur la reconnaissance moléculaire. Le potentiel de cette discipline a une nouvelle fois été mis en lumière en 2016, lorsqu'un autre chimiste français, Jean-Pierre Sauvage, s'est vu attribuer le prix Nobel avec Fraser Stoddart et Bernard L. Feringa pour l'ensemble de leurs avancées sur les machines moléculaires.

La maîtrise des processus d'auto-assemblage, souvent conduits sous contrôle thermodynamique, permet d'accéder à des structures très complexes souvent inatteignables par les méthodologies développées en chimie conventionnelle. Celles-ci sont généralement obtenues par auto-organisation de briques élémentaires simples, construites grâce à la boîte à outils du chimiste organicien, en exploitant la nature réversible et auto-correctrice du processus d'association. L'étendue des possibilités synthétiques qu'offre cette approche confère à cette discipline un champ d'investigation très vaste souvent à l'interface avec la biologie, la physique, la physico-chimie et le domaine des matériaux. Elle favorise donc par ce biais les actions de recherche transversales.

La chimie supramoléculaire repose sur des fondements largement inspirés par les processus du vivant. Nous pouvons citer de manière non exhaustive le transport moléculaire et énergétique, la reconnaissance cellulaire, la catalyse, autant de domaines dans lesquels elle trouve des applications.

Un des domaines de la chimie supramoléculaire tire parti des composés biologiquement actifs pour concevoir des systèmes biomimétiques et des matériaux hybrides adaptatifs (systèmes membranaires, canaux ioniques, biocapteurs sélectifs). Les concepts de chimie combinatoire dynamique se développent également de façon continue et trouvent des applications dans les matériaux pour le stockage, le relargage de petites molécules d'intérêt, ou encore la purification de l'eau salée (sujet primordial s'il en est).

Les systèmes de type « hôte-invité » suscitent beaucoup d'attention à la fois pour le développement de concepts très fondamentaux mais aussi pour leurs applications potentielles dans des domaines aussi étendus que la vectorisation de médicaments, la dépollution, le stockage de molécules instables ou encore la catalyse en milieu confiné. Notons que les hôtes eux-mêmes peuvent être construits par auto-assemblage comme par exemple les doubles hélices de foldamères, les capsules ioniques, ou encore les cages de coordination.

Un intérêt particulier est également porté à la conception de systèmes supramoléculaires fonctionnels pour lesquels l'application d'un stimulus externe tel que la lumière, un changement de pH ou un transfert d'électron permet une modulation des propriétés. Ces transformations peuvent s'appliquer au relargage contrôlé d'invité, au métamorphisme moléculaire ou encore à la conception d'interrupteurs ou de moteurs moléculaires.

Le contrôle de l'auto-assemblage de petites molécules permet d'étendre leur organisation à l'échelle du matériau et ainsi la création de nouveaux objets supramoléculaires. Citons entre autres les architectures nanoporeuses pour la conception de capteurs ou le stockage de gaz, les polymères dotés de propriétés autoréparantes, les organogels exploités pour leurs propriétés rhéologiques, ou encore les cristaux liquides pour leurs diverses applications dans les domaines de l'affichage ou de l'électronique moléculaire.

Globalement, les concepts de la chimie supramoléculaire permettent d'accéder à des

objets dotés de propriétés nouvelles, et qui ouvrent la voie à des applications potentielles dans des domaines très variés. Les vastes contours de cette discipline lui confèrent une très grande transdisciplinarité que la communauté se doit de cultiver.

IV. Matériaux Moléculaires

La chimie des matériaux moléculaires et les nanosciences continuent leur forte progression et demeurent des champs très actifs et novateurs de la chimie organique. Les applications finales alimentent en amont une chimie créative et dictent des voies de synthèse originales. De nouveaux outils de chimie synthétique doivent sans cesse être développés, faisant appel à la chimie du carbone, la chimie des hétéroatomes et à l'ingénierie moléculaire au sens large. Ainsi, la chimie des systèmes polyaromatiques (PAHs) est en plein essor et voit le développement de nombreuses classes de composés très originaux à base de carbone (analogues de graphènes et de nanotubes de carbones, dérivés des fullerènes). De nombreuses percées scientifiques sont également attendues en chimie de l'azote, bore, fluor, phosphore, soufre, silicium, sélénium, etc... Par ailleurs, de nombreux systèmes moléculaires polyazotés à architectures spécifiques (comme les porphyrines, les bore-dipyrométhènes, les radicaux polyazotés) restent des sujets d'études et de créativité importants. D'autres chimies spécifiques comme la chimie radicalaire sont développées pour des visées synthétiques de molécules dédiées (polymères, molécules porteuses de spin...). Enfin, l'ingénierie moléculaire qui consiste à assembler des briques moléculaires possédant des propriétés bien ciblées (chromophores pour l'optique linéaire ou non linéaire, colorants organiques, systèmes donneurs ou accepteurs d'électrons, systèmes électro- et photo-rédox, systèmes chiraux...) demeure au centre de nombreux domaines de la science des matériaux. Ce développe-

ment synthétique s'effectue non seulement à l'échelle de la molécule, mais aussi dans les oligomères, les polymères, les dendrimères et les nanoparticules organiques.

En effet, la composition chimique d'un nouvel édifice ne constitue pas une condition suffisante pour l'élaboration d'un matériau efficace. Sa topologie et son organisation dans le milieu d'étude (état gazeux, liquide ou solide, milieu biologique...) doivent être bien connues, bien appréhendées et maîtrisées. Il faut donc tenir compte de motifs structuraux à interactions spécifiques (liaisons hydrogènes, halogènes, interactions π ...) ou des propriétés inhérentes de la molécule (stéréochimie, chiralité), à la fois au niveau intra- et intermoléculaire. De cette façon, sont conçues des architectures sophistiquées à structure tridimensionnelle contrôlée, de type foldamères, polymères supramoléculaires, systèmes multivalents, dendrimères. Cet aspect est donc en relation forte avec le domaine de la chimie supramoléculaire. En fonction de l'application visée, ces architectures doivent aussi répondre à des contraintes environnementales, ainsi qu'à un cahier des charges précis (en termes de stabilité thermique, photochimique, innocuité...), notamment pour des visées industrielles ou médicales. Ces travaux nécessitent donc le développement d'outils de caractérisation adaptés, pour la compréhension *in fine* de leurs propriétés variées.

Avec ces systèmes chimiques à disposition, de nombreux domaines d'applications en plein essor seront ainsi envisagés et nous n'en citons ici que quelques exemples : les colorants pour des applications en photovoltaïque et le développement de processus encore mal connus comme la fission de singulet ou les concentrateurs solaires ; les systèmes émissifs pour des applications en optoélectronique (processus d'émission spécifiques du type TADF, annihilation triplet-triplet, ou émission polarisée dans les diodes électroluminescentes) ; les chromophores pour l'imagerie biologique, et notamment le développement de nouvelles techniques comme l'imagerie photo-acoustique ; les nanoparticules de silice et les silices mésoporeuses pour l'imagerie, la photothérapie dynamique, la libération de

principes médicamenteux ; les ligands photo-actifs et/ou rédox-actifs greffés sur des matériaux supports variés comme des nanoparticules métalliques ou des électrodes, pour des applications en détection par résonance plasmon, en catalyse électroactive ou photorédox.

Ainsi, la chimie des matériaux et les nanosciences couvrent des domaines variés : (a) les microsystèmes pour l'électronique, l'optoélectronique, la spintronique, la micro-fluidique en lien avec une évolution vers la miniaturisation ; (b) les nanomatériaux intelligents et fonctionnels organiques ou hybrides ; (c) les nanomatériaux pour les sciences de la vie (biologie, thérapie ou diagnostic en médecine) : nanobiosondes pour l'imagerie, nanocargos pour des processus de vectorisation, nanoparticules pour la thérapie ; (d) les systèmes en action (commutateurs et moteurs moléculaires).

La synthèse de nouveaux matériaux moléculaires doit donc rester très créative afin de répondre aux enjeux sociétaux et environnementaux.

V. Outils physico-chimiques (pour l'analyse des molécules, la compréhension des mécanismes et des propriétés des matériaux optiques, électroniques...)

A. Spectroscopies RMN, RPE, spectrométrie MS

1. RMN

La spectroscopie RMN est un outil incontournable pour les chimistes, permettant le suivi à l'échelle atomique de toute une gamme de processus chimiques et la caracté-

sation des composés de différentes tailles et différents états d'agrégation, de petites molécules isolées en solution à des architectures complexes insolubles.

L'introduction de spectromètres RMN « haut champs » et « très haut champs » permettant des études en solution ou en phase solide, et utilisant (ou non) la technologie de sondes de mesure cryogéniques multi-noyaux performantes a conduit à des avancées importantes en chimie structurale et analytique (noyaux peu sensibles ou faiblement abondants) mais aussi en biologie structurale et en métabolomique. Le développement de sondes RMN du solide sous rotation ultra-rapide à l'angle magique, permettant la rotation d'échantillons à des fréquences de plus de 100 kHz, couplée à des avancées méthodologiques clés (dans les techniques de découplage et de transfert d'aimantation, de détection du proton, de séquences d'impulsions multidimensionnelles), a récemment ouvert des voies analytiques radicalement nouvelles pour la caractérisation d'assemblages biomoléculaires de grande taille (protéines membranaires, fibrilles, virus), de formulations pharmaceutiques innovantes, ou encore de matériaux fonctionnalisés complexes, notamment paramagnétiques. Dans le domaine des biomolécules, les performances analytiques de la spectroscopie RMN en phase solide s'approchent en particulier de celle en solution (détermination de la structure, de la dynamique et des interactions). De nouvelles avancées méthodologiques et instrumentales devraient voir prochainement le jour avec le développement à haut champ magnétique de prototypes de sondes tournant au-delà de 150 000 tours/seconde.

En parallèle, le développement de techniques d'hyperpolarisation a récemment modifié les contours de la RMN. Aujourd'hui des gains en sensibilité de plus de deux ordres de grandeur sont obtenus sur des substrats à l'état solide sous rotation à l'angle magique (DNP MAS), et de plus de 4 ordres de grandeur sur des composés en solution préalablement polarisés à basse température (DNP par dissolution). Ces avancées ont ouvert la voie (entre

autres) à l'étude de la surface de nanomatériaux structurés ou à l'observation d'intermédiaires réactionnels. Le développement de nouveaux agents de polarisation a récemment permis d'améliorer l'efficacité de la DNP MAS à très haut champ magnétique (800 MHz). Il reste cependant des verrous majeurs à lever en termes de méthodologie et d'instrumentation pour que ces approches puissent être exploitées plus largement. Les approches pour améliorer la RMN hyperpolarisée à l'état solide sont aujourd'hui centrées sur le développement de nouvelles instrumentations et accessoires (sources de microondes pulsées, sondes MAS DNP à très haute vitesse de rotation, systèmes de refroidissement à l'hélium), de sources de polarisations plus efficaces (radicaux hybrides, paramagnétisme endogène, matrices polarisantes), de formulations innovantes. Les applications ciblent les surfaces et les interfaces complexes, la détection d'espèces diluées, la caractérisation *in cellulo*, *in vitro* ou *in operando* de la structure et des interactions d'assemblages multi-composants dont des assemblages biologiques multi-domaines. De façon similaire, coté RMN hyperpolarisée en solution, le défi repose sur l'amélioration de l'instrumentation (polarisation, dissolution et transfert plus efficaces), sur le développement d'outils spectroscopiques adaptés aux temps de vie courts de l'aimantation hyperpolarisée (techniques multidimensionnelles ultrarapides), sur de nouvelles stratégies pour le transport de métabolites hyperpolarisés. Ces approches ont le potentiel pour étendre notre compréhension de la chimie (détection d'intermédiaires réactionnels ou de traces) et révolutionner l'imagerie médicale (détection de réactions métaboliques dans des tissus cancéreux).

L'introduction de matériaux supraconducteurs « haute température » (HTSC) a récemment offert de nouvelles opportunités pour le développement des aimants RMN à très hauts champs (2 spectromètres à 1,2 GHz sont actuellement en champ et plusieurs en commande). Un projet national de spectromètre RMN opérant à 1,2 GHz a été lancé en 2014, et l'installation de la machine devrait avoir lieu à Lille en 2022 (après d'autres installations en Italie, Alle-

magne, Suisse et Pays-Bas). En termes de sensibilité, ce nouveau type d'aimant offrira notamment de nouvelles opportunités pour la détection des isotopes peu sensibles, qui représentent presque la moitié des isotopes observables par RMN mais aussi pour la caractérisation des défauts ou interfaces dans des matériaux organiques, inorganiques ou hybrides. Par ailleurs, le gain en résolution et la sensibilité obtenue à 1,2 GHz devraient se révéler déterminant pour l'étude des systèmes biologiques complexes ou des matériaux avancés.

2. RPE

La RPE est aujourd'hui une voie essentielle pour les études de structures, propriétés et réactivités des espèces paramagnétiques. Elle permet d'accéder à des informations très détaillées non seulement sur les radicaux et les ions métalliques de transition mais également sur leur environnement de manière non-invasive. La généralisation de spectromètres variés (haut-champs, méthodes impulsives, basses températures...), le développement de nouvelles sondes ainsi que les couplages avec des techniques variées (RMN, électrochimie, spectroscopie...) ont permis des avancées marquantes au cours de ces dernières années dans de très nombreux domaines de la chimie allant de la catalyse aux matériaux mais également en biologie moléculaire. La technique de RPE par spin trapping consiste en l'addition d'un radical fugace sur un piège (spin trap) diamagnétique pour former un adduit de spin paramagnétique de durée de vie suffisante pour une détection par RPE. L'analyse du spectre de l'adduit permet d'identifier un type de radical, et dans les cas les plus favorables, d'en déterminer la structure précise. En complément, l'outil théorique peut également donner des informations sur la nature du radical, en permettant la détermination de la distribution de la densité de spin, la visualisation de sa SOMO (Semi Occupied Molecular Orbital) et la simulation du spectre expérimental. Cette technique a permis notamment des avancées dans la compréhension des mécanismes radicalaires en chimie organique et des polymères.

La spectroscopie RPE en France compte parmi les domaines particulièrement développés au niveau international, avec des appareillages avancés (RPE impulsionsnelle, doubles résonances électronique-nucléaire et électronique, imagerie RPE, RPE à hauts champs et hautes fréquences) à la pointe de la technologie moderne et une expertise scientifique reconnue. L'implémentation d'appareils à très haut-champs (263 GHz) en France à l'horizon 2020 devrait permettre d'étendre encore le potentiel de cette technique et ses champs d'application.

3. Spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse est une technique très répandue qui se caractérise par une très grande diversité instrumentale mais aussi concernant les domaines d'applications (matériaux, chimie, biologie...).

Ces dernières années, la spectrométrie de masse (MS) a connu des développements technologiques et méthodologiques importants notamment grâce à la démocratisation de la spectrométrie de masse à très haute résolution avec le développement de l'Orbitrap à haut champ et la commercialisation du couplage de la spectrométrie de mobilité ionique avec la spectrométrie de masse (IMS-MS).

Aujourd'hui la spectrométrie de masse à transformée de Fourier que ce soit avec des Orbitrap ou des spectromètres de masse à transformée de Fourier et résonance cyclotronique des ions (FTICR) permet l'analyse de mélanges de plus en plus complexes grâce à leur très haute résolution et très grande précision de mesures. Les FTICR à très haut champs associés à de nouvelles cellules harmonisées, à l'utilisation du mode absorption et à des techniques de détection quadratique, permettent d'obtenir des résolutions de plusieurs millions et des précisions de mesures de quelques dizaines de ppb. Cette résolution donne accès notamment à la structure isotopique fine pour confirmer sans ambiguïté l'attribution d'une formule brute. L'analyse rapide sans séparation de mélanges très complexes comme la matière

organique (biohuiles, suies...) pouvant contenir des dizaines de milliers de formules brutes différentes est ainsi possible. Des instruments FTICR sont accessibles facilement à la communauté dans le cadre de l'infrastructure de recherche du CNRS FTICR à haut champ avec des instruments allant de 7 à 12 Teslas. Des chercheurs français se sont récemment illustrés dans le renouveau de la FTICR bidimensionnelle en adaptant des approches issues de la RMN.

La spectrométrie de mobilité ionique (IMS) est une technique relativement ancienne mais ce n'est que très récemment que des instruments commerciaux associant l'IMS avec la MS (IMS-MS) sont disponibles et que son application au domaine de la chimie a été mise en œuvre. La mobilité ionique est une méthode de séparation en phase gazeuse qui permet la détermination des sections efficaces de collision (CCS). Cette technique ne cesse de se perfectionner avec le développement de cellules IMS de plus en plus résolutive comme l'arrivée récente d'une cellule cyclique permettant d'obtenir des résolutions de plus de 600. La CCS au même titre que la masse est un descripteur intrinsèque des ions et est prédictible. L'IMS permet la distinction d'isomères que ce soit pour l'étude de conformation de biomolécules ou la distinction d'isomères de petites molécules. Des travaux récents ont montré le grand intérêt de ce couplage pour la caractérisation d'intermédiaires de synthèse de faible durée de vie.

Les travaux aux interfaces entre la chimie et de la biologie restent des domaines très actifs avec en particulier la métabolomique et la protéomique. Ces domaines voient leurs champs d'applications s'étendre de par les progrès de l'instrumentation de plus en plus sensible et rapide ainsi que le développement d'outils d'analyse informatique performants. La gestion des grandes quantités de données multidimensionnelles générés reste un défi majeur. Pour la protéomique beaucoup de chercheurs s'intéressent aujourd'hui à la caractérisation de protéines intactes dans des approches dites « top down » pour mieux appréhender les modifications post-traductionnelles. En métabolomique, et glycomique, de nombreuses études

impliquant le couplage avec la mobilité ionique ouvrent la voie à des études structurales plus poussées. Avec des sources d'ionisation de surface comme le MALDI, l'imagerie par spectrométrie de masse est devenue une technique majeure pour comprendre les répartitions spatiales des métabolites sur des coupes de tissus biologiques.

4. Infrastructures de recherche

L'accès à de très grands instruments dans le cadre d'infrastructures de recherche distribuées (les IR RMN, THC, FT-ICR et RPE) est un atout remarquable pour la communauté scientifique française. Ces plateformes techniques fournissent un accès à des instruments d'exception, dont les unités de recherche ne pourraient se doter individuellement, ainsi qu'une expertise et un support technique et scientifique de très haut niveau, pour la réalisation d'expériences dans de nombreux domaines d'application. Si ces infrastructures de pointe (uniques en Europe et dont le fonctionnement exemplaire est reconnu internationalement) sont cruciales dans un contexte scientifique très compétitif, il est nécessaire qu'elles s'appuient sur une recherche nationale solide constituée d'un ensemble d'entités actives de plus petites tailles (laboratoire, équipe, groupe), et possédant une expertise locale et des thématiques de recherche propres, originales et variées.

B. Études mécanistiques et modélisation

L'aspect structural ne peut être déconnecté des aspects cinétiques qui permettent d'accéder à des données importantes pour la détermination des mécanismes de processus moléculaires. Ainsi, la compréhension des mécanismes a évolué par l'utilisation de techniques d'investigation pour étudier des étapes élémentaires comme celles précédemment citées mais aussi grâce aux spectroscopies

classiques ou ultra-rapides et à l'électrochimie. Ces outils permettent la compréhension fine à l'échelle moléculaire et, de manière plus prospective, le design rationnel de nouvelles réactions. Ainsi des avancées importantes ont été réalisées dans des domaines bien établis comme la chimie organique et organométallique mais aussi dans des domaines en plein développement comme la catalyse photorédox ou l'électrosynthèse. Un grand nombre d'études décrites dans notre communauté mettent actuellement en jeu une véritable approche synergique entre synthèse et chimie computationnelle. Cette dernière permet une description détaillée du processus chimique mais contribue également à l'optimisation de réactions ou au développement de nouvelles stratégies de synthèse. Actuellement, il s'agit du domaine le plus actif au niveau des collaborations entre expérimentateurs et théoriciens. La modélisation est en effet devenue un outil standard en chimie moléculaire. Elle se nourrit des données expérimentales collectées concernant la détermination de structures d'intermédiaires ou des études cinétiques et peut inversement aider à l'identification de ces intermédiaires et permettre une description précise et détaillée de ces derniers. À l'heure actuelle, une grande majorité des études réalisées utilise principalement la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) avec l'incorporation ou non de la dispersion. Des méthodes hybrides de type QM/MM ou ONIOM sont également employées. L'ensemble de ces méthodes permettent d'étudier et de décrire en détail les structures géométriques, électroniques et le comportement réactionnel des systèmes moléculaires réels (effets stériques et électroniques), en considérant en partie son environnement (solution, phase gazeuse). Le solvant, peut-être pris en compte dans les simulations soit de manière explicite soit de façon implicite. Tout ceci est bien évidemment possible grâce aux clusters de calculs de plus en plus performants localisés dans les laboratoires mais surtout dans des centres de calculs régionaux et nationaux (GENCI), ces derniers permettant d'avoir accès à un panel important de logiciels de chimie quantique. Les calculs

jouent un rôle essentiel et indispensable dans la compréhension de mécanismes réactionnels à l'échelle moléculaire en précisant si une réaction est sous contrôle thermodynamique ou cinétique et en donnant accès aux barrières d'activation des étapes élémentaires, permettant ainsi de discriminer entre différentes voies possibles. De plus, cette description donne également accès à des informations sur l'origine de diverses sélectivités, telles que les chimio, régio- et stéréosélectivités. Toutefois, les conclusions obtenues ne sont pas toujours transférables d'un système à un autre et il n'est pas toujours simple d'anticiper l'impact d'un substrat, d'un solvant, d'un ligand, d'un substituant sur le processus sans avoir à le modéliser entièrement. Néanmoins, la mise au point de nouveaux systèmes moléculaires plus efficaces et sélectifs ou de catalyseurs plus performants demeure une des questions principales à laquelle la chimie computationnelle doit répondre. Dans ce contexte, l'application de « Machine Learning » trouve tout son intérêt. Cet outil, encore à ses premiers balbutiements, devrait prendre de plus en plus d'importance dans les années à venir pour résoudre des problématiques dans le domaine de la chimie organique et de la catalyse homogène, l'objectif étant d'anticiper la réactivité sans avoir à calculer l'ensemble des combinaisons catalyseurs/substrats/conditions expérimentales. Enfin, l'utilisation d'outils théoriques d'analyse de liaisons plus spécifiques, conduit également à une étude fine de la structure dans des intermédiaires réactionnels clés ou des systèmes réactifs originaux. Ils permettent une description de modes de liaisons inusuels ainsi que celles d'interactions faibles de types liaisons hydrogènes, non covalentes, interactions agostiques, qui sont primordiales dans certains processus catalytiques ou dans des systèmes protéines-membranes. Bien que moins répandu, ce type d'analyse connaît à l'heure actuelle un développement croissant. Ces descripteurs sont basés sur des analyses orbitales, des analyses topologiques de la densité ou des méthodes d'analyse énergétiques. Souvent utilisés de manière couplée, ils sont donc particulièrement utiles pour compléter les déterminations expérimentales de

paramètres structuraux tels que des longueurs de liaisons ou la distribution de la densité électronique.

C. Synthèse pour l'imagerie

L'imagerie TEP (tomographie par émission de positons) est une technique d'imagerie médicale fonctionnelle non invasive. Elle est basée sur l'utilisation de molécules spécifiques, susceptibles de se fixer sur des cibles d'intérêts. Ces composés organiques doivent être radiomarqués avec un isotope émetteur de positons, à savoir du fluor-18 ou du carbone-11.

Afin de pouvoir proposer de nouveaux outils de diagnostic, la conception et la synthèse de nouveaux radiotraceurs est un domaine en plein développement. Néanmoins, une telle activité se décline suivant deux axes complémentaires. D'une part, la conception de nouvelles molécules sélectives et spécifiques susceptibles de se fixer sur les cibles pathologiques afin de disposer de nouveaux outils pharmacologiques pour mieux comprendre le fonctionnement de la pathologie et, à terme, disposer de nouvelles sondes pour le diagnostic.

D'autre part, cette activité de synthèse de nouveaux composés doit s'accompagner d'une étape de radiomarquage consistant à introduire le carbone-11 ou le fluor-18 sur le substrat. Du fait de la spécificité de ces deux radioisotopes (sources restreintes, demi-vie très courte), les méthodes de radiomarquage sont encore très limitées. Le défi de ces dernières années est de développer de nouvelles méthodes permettant d'introduire sélectivement ces isotopes sur des composés organiques, dans les dernières étapes de la synthèse, *via* des réactions très variées, très rapides et facilement automatisables. Ce développement méthodologique est important car il permet d'accéder à de nouveaux radiotraceurs difficilement accessibles avec les méthodes actuelles.

Conclusion

Ce rapport de conjoncture tente de dresser un état des lieux des recherches menées au cours des cinq dernières années par les chercheurs et enseignants-chercheurs de la section 12 du CoNRS. Nous n'avons pas pu être exhaustifs mais avons néanmoins tenté de montrer à quel point notre discipline est innovante et indispensable aux progrès des sciences des matériaux, de la chimie du vivant et de la chimie fine.

L'exploration de l'espace chimique n'en est qu'à ses débuts. Elle requiert des efforts continus et importants pour aider à l'élaboration de nouveaux objets moléculaires dans une démarche respectueuse de l'environnement.

La section attache par ailleurs une importance très forte à l'interdisciplinarité ; la science des matériaux moléculaires intègre tout particulièrement de nombreux aspects développés dans les autres sections de l'INC (chimie de coordination, chimie organométallique, biochimie, chimie des polymères, physicochimie, spectroscopies, chimie théorique...); elle veillera toutefois à conserver son cœur de métier qu'est la synthèse organique.

SECTION 13

CHIMIE PHYSIQUE, THÉORIQUE ET ANALYTIQUE

Composition de la section

Philippe HAPIOT (président de section), Aurélien de la LANDE (secrétaire scientifique), Marie-Laure BOCQUET, Agnès BUSSY, Michel CAFFAREL, Nicolas CLAVIER, Olivier DONARD, Tioga GULON, Petra HELLWIG, Alexander KUHN, Jean-Christophe LACROIX, Guillaume LAURENT, Adèle LAURENT, Sophie LECOMTE, Frédérique LOISEAU, Jean-Pierre MALVAL, Arnaud MARQUETTE, François MAUREL, Antonio MONARI, Marc SIMON, Caroline TOKARSKI.

Résumé

Le domaine d'expertise de la section 13 est comme l'indique son intitulé la physico-chimie, discipline qui couvre de larges domaines disciplinaires situés à l'interface de la chimie et de la physique. Ce rapport de conjoncture rédigé par les membres de la section fait un point sur les avancées et points qui semblent les plus prometteurs pour les prochaines années.

section 13 rassemble des compétences très diverses permettant d'aborder les problématiques avec une vision qui n'a rien à envier à celle d'une section interdisciplinaire. Nous explorerons dans ce rapport divers domaines allant de la chimie théorique, les spectroscopies, l'électrochimie, la photochimie et jusqu'aux sciences analytiques et leurs applications vers l'environnement et la radiochimie.

Le rapport est organisé par sous domaines :

– La chimie théorique, qui met en œuvre des méthodes mathématiques traduites en algorithmes et implantées dans des programmes informatiques, vise à comprendre, interpréter et prédire les propriétés spatiales et dynamiques de la matière à l'échelle atomique.

– La spectroscopie et la photochimie sont deux domaines fortement interdisciplinaires se situant à l'interface de la physique, la biologie et la chimie.

Introduction

Le domaine d'expertise de la section 13 est la physico-chimie, discipline qui couvre de larges domaines disciplinaires à l'interface de la chimie et de la physique. De ce fait, la

– L'électrochimie joue un rôle crucial, dans de nombreux domaines scientifiques, allant de la chimie à la physique en passant par les nanosciences et la biologie.

– La chimie analytique qui a pour objet l'identification, la caractérisation et la quantification des substances chimiques ou biochimiques et qui se base sur une forte composante fondamentale pour ses futurs développements mais aussi sur de la recherche instrumentale, intimement liée à des développements méthodologiques.

– La radiochimie repose sur l'étude des propriétés physico-chimiques des radionucléides.

Compte tenu de la diversité des domaines, ce rapport de conjoncture ne prétend pas présenter une vision exhaustive de l'ensemble de ces domaines. Nous avons choisi de mettre en avant les thématiques qui au cours de notre travail de section sont apparues comme évoluant rapidement ou susceptibles de présenter des enjeux majeurs.

I. Chimie Théorique

La chimie théorique se situe à la croisée de la chimie, de la physique, des mathématiques appliquées, des sciences numériques et de l'information, ainsi que de l'informatique. Le succès de la discipline a entraîné son évolution récente et le développement d'applications sans cesse plus réalistes, ce qui exige une expertise croissante dans des domaines aussi divers que la biologie, les sciences des matériaux ou celles de l'environnement ou de l'énergie, pour ne citer que les plus importants. On assiste à une extension du périmètre du champ d'activité et des compétences du chimiste théoricien, avec les opportunités qui en découlent, notamment en termes de formation des jeunes et d'interdisciplinarité. Les défis posés par les systèmes complexes appellent également une mise en question de la distinction traditionnelle entre théorie et applications

en chimie théorique. En effet, la résolution des problèmes scientifiques complexes au delà de l'état de l'art est rendue possible par des développements méthodologiques originaux favorisant l'émergence et l'interprétation de nouvelles observations expérimentales. Les défis à relever se nourrissent donc mutuellement à l'interface entre les applications et la théorie. Ainsi, la différence entre deux communautés qui étaient récemment identifiables s'estompe.

A. Impacts et enjeux

Le développement d'applications à fort impact scientifique et technologique a été rendu possible par la définition de protocoles de modélisation et de simulation bien établis. Ils combinent des modèles théoriques préalablement calibrés sur des données expérimentales et par des logiciels performants grandement diffusés et validés par la communauté internationale. La chimie théorique permet alors la réalisation de véritables expériences numériques *in silico*. Cela rend possible, entre autre, l'interprétation voire la prédiction de données expérimentales atteignant une résolution au niveau atomique et électronique, ainsi que l'exploration de régimes difficiles à atteindre par l'expérience. Cependant, la nécessité de considérer de façon critique les domaines de validité et les niveaux d'approximation utilisés s'impose, comme pour toute discipline scientifique. Cette exigence est couplée avec le besoin constant d'amélioration des méthodes pour reproduire les situations pour lesquelles les modèles actuels sont inopérants ou trop imprécis; le développement méthodologique dans tous ces aspects reste donc un enjeu majeur de la discipline. Dans un panorama qui privilégie de plus en plus les applications à fort impact sociétal, un regard critique sur les limites des méthodes de modélisation et de simulation et leur amélioration doit donc être soutenu.

B. Traitement de la complexité

Au vu de l'évolution de la chimie théorique vers des applications plus réalistes, la notion d'approches multi-échelles devient cruciale permettant, notamment, la description des systèmes allant des atomes aux agrégats macromoléculaires et aux systèmes mésoscopiques, tout en prenant en compte à la fois la structure électronique, son évolution et les propriétés structurales et dynamiques. La description de la complexité des systèmes, des phénomènes, des environnements et de l'évolution temporelle devient de plus en plus prégnante et centrale. Toutefois la complexité traitée à l'aide d'approches multi-échelles demande des développements innovants à chacun des niveaux.

Les méthodes de la chimie quantique reposant sur la densité électronique (DFT) ou sur la fonction d'onde, incluant le cas échéant les effets relativistes, sont au cœur de nombreuses applications et doivent continuer à être développées. Par exemple, la DFT qui est l'une des approches permettant d'étudier des systèmes de tailles difficilement abordables autrement est toujours confrontée à des situations critiques (*e.g.* états excités multiples en photochimie, des matériaux fortement corrélés, etc.). Les efforts visant à introduire la corrélation statique, qui est le maillon faible de la DFT, gardent donc toute leur importance, par exemple, les développements des théories à séparation de portée ainsi que des méthodes hybrides DFT/fonctions d'onde. Concernant les méthodes d'interaction de configuration et ses nombreuses variantes, on assiste à une véritable efflorescence d'approches nouvelles basées sur des représentations alternatives de la fonction d'onde (*e.g. matrix product state ou tensor network representation*) ainsi que d'algorithmes sophistiqués de sélection de configuration aux performances inégales. Au-delà, toujours dans la perspective de simuler de très grands systèmes sur des échelles temporelles longues, les méthodes semi-empiriques comme la DFT-Tight Binding ou la DFT moléculaire sont en plein essor.

La description de la structure des systèmes macromoléculaires passe aussi par l'utilisation de champs de forces classiques; au niveau tout-atome en particulier polarisable, ou de type gros-grains. La communauté est fortement impliquée dans l'élaboration de ces approches.

La complexité des systèmes nécessite un traitement différencié suivant les échelles d'espace considérées. Dans ce cadre les méthodes hybrides de type QM/MM ou l'«*embedding quantique*» gardent toute leur importance et appellent encore à des développements importants au niveau des champs de forces ou du couplage entre les différents niveaux quantiques.

La modélisation de systèmes complexes tendant à être de plus en plus réalistes est liée au développement de méthodes efficaces d'échantillonnage des surfaces d'énergie libres et de dynamiques biaisées aux niveaux quantique, classique ou hybride. Le problème général de l'échantillonnage d'évènements rares et de l'estimation des barrières d'énergie libre (réactions chimiques, changements conformationnels et structuraux de grandes ampleurs dans les biomolécules, les matériaux et interfaces) peut être considéré comme un problème encore non entièrement résolu en dépit des avancées considérables effectuées notamment par la communauté française. Un des problèmes les plus importants concerne la définition sans *a priori* des variables collectives pouvant décrire le problème d'intérêt. Différentes méthodes s'appuyant sur les techniques d'apprentissages automatiques développées dans le cadre de l'intelligence artificielle apparaissent dans la littérature depuis quelques années et se doivent d'être activement poursuivies.

C. Quelques illustrations de la complexité

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous illustrons la complexité dans trois domaines couverts par la section 13.

La modélisation des matériaux et de leurs propriétés réalise des percées, souvent issues d'études combinées théoriques et expérimentales. Ces matériaux se déclinent en matériaux bi-dimensionnels, en MOFs (Metal Organic Frameworks), en oxydes complexes pour les matériaux d'électrodes, en pérovskites pour le photovoltaïque, en matériaux pour le transport à l'échelle de jonctions moléculaires ou en matériaux poreux pour le stockage de l'énergie. Le principal défi est de décrire et comprendre ces matériaux *in operando*. Cela implique de modéliser l'interface avec un autre milieu moins dense (*e.g.* électrolyte, liquide ou gaz) et/ou subissant l'action d'un stimulus extérieur comme un champ électromagnétique, une différence de potentiel électrique ou chimique ou encore une variation de pression. Une autre frontière est la modélisation réaliste de la croissance des nanoparticules, en particulier métalliques, des phénomènes électroniques qui peuvent s'y produire et qui posent des difficultés redoutables.

La communauté française continue d'être extrêmement active dans le domaine de la photochimie et de la photophysique théoriques, appliquées à la biologie, à la chimie organique et inorganique et au domaine des nanomatériaux. La simulation de l'évolution temporelle des systèmes dans les états excités à l'échelle femtoseconde a donné lieu à des avancées importantes dans le développement des algorithmes de propagation rendant compte du couplage non-adiabatique électrons/noyaux, de cohérences quantiques entre états et d'effets topologiques fins apparaissant au voisinage d'intersections coniques. La prochaine frontière se situe dans le domaine de l'attoseconde. Cette échelle temporelle laisse entrevoir des perspectives fascinantes comme, le contrôle ou le suivi temporel des réactions chimiques par des impulsions ultra-brèves. Cependant, d'un point de vue méthodologique beaucoup reste à faire dans le domaine de la photochimie *in silico*. Il s'agit en particulier d'élaborer des méthodes précises, fiables et efficaces de calcul des surfaces d'énergie potentielle des états excités et des couplages entre états.

Les méthodes théoriques sont poussées dans leurs limites pour répondre à des questions importantes de biologie moléculaire. Cela inclut les mécanismes moléculaires expliquant l'allostérie, la machinerie biomoléculaire régulant les voies de signalisation, le métabolisme énergétique ou la régulation de l'expression des gènes (*e.g.* ATP synthase, ADN nucléosomal, photosynthèse, transporteurs et récepteurs transmembranaires, protéines de transferts d'électrons...). Les progrès des algorithmes et du traitement de données permettant notamment le traitement de systèmes ou d'environnements très encombrés augurent d'avancées conceptuelles dans la compréhension des réseaux complexes d'interactions de biomolécules (membranes/protéines, protéines/protéines, ADN/protéines...), de leurs modulations et de leurs dynamiques.

D. Développement logiciel et formation

La mobilisation en parallèle d'un nombre toujours plus important de cœurs de calculs, (on atteint maintenant le million), ou encore l'utilisation massive de processeurs graphiques (GPU) permettent d'aborder des problématiques nouvelles. Il devient néanmoins crucial que les algorithmes gèrent de façon optimale la puissance de calcul et la mémoire pour tirer pleinement partie des architectures hautes performances.

À titre d'exemple des simulations de dynamique moléculaire classique de systèmes biologiques, de matériaux ou d'interface couvrant les échelles micrométriques et de la microseconde sont aujourd'hui réalisées dans les laboratoires du CNRS.

Il devient essentiel d'amplifier l'adaptation des méthodes, des algorithmes et notamment les codes de la chimie quantique aux calculs haute performance. Pour autant, des avancées importantes ont été réalisées dans le cadre des

algorithmes basés sur les méthodes de l'algèbre linéaire. Parallèlement, et comme annoncé dans le rapport de 2014, le développement des méthodes stochastiques particulièrement bien adaptées au calcul massivement parallèle, s'est en effet accéléré depuis lors et des versions stochastiques de plusieurs méthodes de la chimie théorique ont par exemple été proposées.

À la différence d'autres disciplines, comme la physique ou les mathématiques appliquées, la communauté de modélisation et de simulation moléculaire concentre ses efforts dans un nombre des codes internationaux largement diffusés et optimisés incluant des fonctionnalités multiples. Cette stratégie est de nature à nuancer le constat établi dans le rapport de 2014 «... *Le constat est cependant moins glorieux en matière de valorisation puisque les codes de calculs commerciaux basés en partie sur les avancées méthodologiques françaises et aujourd'hui disséminés à l'échelle internationale n'ont toujours pas de licence française...* ». En effet, il existe en France une activité importante et de grande qualité de co-développement de grands codes internationaux. Afin de rendre ces efforts de développement logiciel plus visibles il est nécessaire d'en établir une cartographie nationale et de s'interroger sur le positionnement de notre communauté. Historiquement, la plupart des codes ayant pris une envergure internationale sont issus de travaux méthodologiques disruptifs ayant ouvert la voie au traitement de systèmes et de problématiques auparavant inaccessibles à la modélisation théorique. Pour l'avenir une démarche à préconiser pour rester à la pointe des développements consistera à repérer et favoriser les ruptures méthodologiques et y concentrer des moyens importants, notamment en termes d'ingénieurs logiciels.

Des propositions de formations pluridisciplinaires intégrant les dimensions chimie et informatique sur cet enjeu stratégique pourraient être faites. Dans cet esprit la création d'un programme ambitieux permettant le développement de logiciels adaptés aux architectures hautes performances actuelles doit être soutenue.

E. Emergence des données massives

La génération massive de données soulève de nombreux défis de nature technique et scientifique : gestion, stockage et sécurisation des données d'une part, exploitation des données pour en extraire des informations pertinentes d'autre part.

À cet égard une partie de la communauté développe des techniques de visualisation innovantes dépassant le simple rôle de l'illustration scientifique pour devenir un outil de découverte de processus complexes presque impossibles à extraire autrement des données brutes des simulations massives. Dans la même veine, l'exploitation des très grands ensembles de données issues des simulations numériques par des méthodes d'intelligence artificielle, d'apprentissage automatique (machine learning), de traitement des données massives (big data) etc. est un domaine actuellement très actif en chimie théorique. La concrétisation de ces potentialités passera à n'en pas douter par des avancées conceptuelles nourries de collaborations avec d'autres disciplines familières du traitement de l'information, des analyses d'image et des inférences statistiques. Dans ce contexte les liens entre la section 13 et la CID 51 trouvent par exemple toutes leurs pertinences.

II. Spectroscopie Photochimie

L'interaction entre la lumière et la matière peut être caractérisée par différentes méthodes (spectroscopie) pour comprendre les mécanismes en jeu ou bien être utilisée pour induire des transformations chimiques (photochimie) agissant ainsi comme déclencheur. La communauté scientifique regroupant la spectroscopie et la photochimie se porte plutôt bien. Les

efforts mis dans les développements de nouveaux matériaux hybrides couplés aux développements instrumentaux permettent de répondre aux différents enjeux sociétaux. Au cours de ces dernières années, un fort développement des sources lumineuses et des appareillages d'analyse a permis l'accès à de nouvelles échelles temporelles et un gain accru en sensibilité et en sélectivité. Ces évolutions se sont également appliquées aux grandes installations de recherche qui gagnent en cohérence et en brillance. Grâce à ces évolutions, la spectroscopie et la photochimie peuvent répondre plus efficacement aux défis sociétaux notamment en environnement, biologie, énergie et santé.

A. Nanoparticules, LED organiques et inorganiques

L'avènement des nanotechnologies s'inscrit dans le développement de nouveaux objets photo-activables associés à la notion de confinement spatial. Les nanoparticules inorganiques, organiques ou hybrides constituent un exemple fondateur de ce principe permettant d'établir des relations dimension-propriétés photo-physiques pertinentes. Le couplage plasmon de surface de nanoparticules métalliques et relaxation électronique d'états excités en surface conduit à des effets d'exaltation ou d'annihilation dramatique. Un des enjeux actuels consiste à adresser ces couplages pour le développement de senseurs à haute sensibilité ou la mise au point de photo-matériaux à réactivité exaltée. Les dispositifs intégrés que constituent les nanoparticules tout organiques sont également en plein développement grâce à des procédés simples et efficaces de fabrication tels que la photo-fragmentation ou la reprécipitation. Ces nanoparticules organiques offrent également un fort potentiel technologique en imagerie 3D haute résolution spatiale car elles constituent des objets prometteurs pour la modulation des dynamiques de diffusion d'excitons contrôlant le mécanisme de *blinking* de la nanoparticule. Dans d'autres

champs d'amplification, certains processus primaires photo-induits tels que la fluorescence retardée thermiquement ou l'annihilation Triplet-Triplet connaissent un regain d'intérêt en particulier pour les matériaux OLED dans un contexte de développement des technologies à très basse consommation d'énergie.

B. Développements pour des descriptions à haute résolution spatial

Les spectroscopies optiques permettent de sonder la matière en utilisant l'interaction lumière/matière. Ces technologies sont fortement interdisciplinaires, en interface avec la physique (pour des développements instrumentaux importants), la chimie pour le développement de sondes et la biologie pour répondre à des problématiques sociétales (cancer, maladies neurodégénératives etc.). Ces dernières années le développement des techniques de super résolution en microscopie de fluorescence (STED, PALM, STORM) a permis de lever le verrou de la limite de diffraction. Des objets fluorescents peuvent être observés au sein de cellule et tissus biologiques avec des résolutions spatiales de l'ordre de 20 nm à 50 nm par détection de molécules uniques. Couplés à des techniques résolues en temps, ces développements permettent ainsi de suivre la dynamique des processus biologiques.

Les spectroscopies optiques vibrationnelles de diffusion Raman et d'absorption infrarouge, étaient jusqu'à récemment limitées en terme de résolution spatiale par la limite de diffraction. Des technologies nouvelles (SERS et SEIRAS) améliorent notablement la sensibilité de détection sans influence sur la résolution. Ces techniques permettent actuellement d'obtenir des résolutions spatiales identiques à celles obtenues par les techniques de super résolution en fluorescence. Le couplage de la microscopie à force atomique avec la diffusion Raman exaltée de surface, a permis le développement du TERS (Tip-Enhanced-Raman Scattering). La métallisa-

tion de la pointe AFM permet d'obtenir l'amplification de la diffusion Raman. Les applications sont nombreuses : études de processus catalytiques, électrochimie, caractérisation de matériaux ou de biomolécules (ADN, protéines amyloïdes) à des résolutions spatiales de 20 à 50 nm. La seconde technique qui reste encore très peu développée en France, même si son inventeur est un enseignant-chercheur français, est la technologie du NanoIR, couplage entre l'AFM et le rayonnement IR. Le rayonnement IR sur l'échantillon induit son expansion thermique qui est sondée par la pointe AFM, la transformé de Fourier du signal obtenu correspond au spectre d'absorption infrarouge de l'échantillon sondé à la résolution de la pointe AFM (20 nm). Cette technologie non destructive a un potentiel d'application dans tous les domaines de la chimie.

Le challenge pour les prochaines années est de développer ces techniques d'imageries de haute résolution spatiale en milieu liquide, pour la description à l'échelle moléculaire de processus chimiques ou biologiques à très haute résolution spatiale (quelques 10 nm).

C. Développements pour des descriptions à haute résolution temporelle

Le fort développement des sources d'excitation a mis en avant la possibilité de suivre à la fois des réactions élémentaires ultra-rapides et le suivi temporel de réactions complexes.

Attochimie. La science à l'échelle de l'atoseconde est un domaine de recherche émergeant utilisant des sources laser pulsées de quelques attosecondes grâce à la génération d'harmoniques élevées. Cette spectroscopie de type pompe-sonde ouvre la voie à l'étude de la dynamique moléculaire à des échelles de temps sub-femtoseconde permettant de suivre les mouvements des électrons au cours des réactions chimiques. Elle peut être appliquée aux ions, atomes, molécules ou surfaces, en

chimie, photochimie ou astrochimie. La spectroscopie attoseconde est souvent couplée à une étude théorique complémentaire aidant à rationaliser les résultats.

TD-THz. L'attention se porte sur le domaine des grandes longueurs d'onde du lointain infrarouge. Cette gamme spectrale met en jeu des énergies faibles d'ondes non-ionisantes. L'amélioration des sources et des détecteurs de THz a permis d'accroître les applications au monde du vivant ou à la détection de gaz. Le domaine THz permet de caractériser des mouvements collectifs de molécules impliquant des centaines d'atomes sur une échelle de temps variant de quelques femtosecondes à la nanoseconde.

Spectroscopie ultra-rapide 2D-IR/UV-vis. Cette méthode utilise des lasers avancés pour générer des spectres multidimensionnels avec une résolution temporelle de l'ordre de la femtoseconde. Elle est adaptée à la détection d'espèces transitoires formées au cours des réactions de processus biologiques tels que la liaison protéine-ligand ou le repliement des protéines. La haute résolution temporelle permet l'observation de processus ultra-rapides sur des systèmes en solution, en couche mince et à des mécanismes de réaction. Les spectroscopies 2D résolues dans le temps ont connu une extension au domaine du visible et plus récemment du proche UV.

Spectroscopie Chirped-pulse. Les études de réactivités en astrochimie connaissent un développement instrumental notable par le biais de la spectroscopie micro-onde à dérive de fréquence (dite « chirped-pulse »). Cette technique permet la détection et le suivi cinétique de réactifs et de produits *in situ* sensibles en un seul balayage en fréquence en conservant une haute résolution spectrale.

D. Vers des méthodes plus sensibles, sélectives

RPE. La spectroscopie de Résonance Paramagnétique Électronique (RPE) s'applique à

l'étude de systèmes extrêmement variés de l'échelle moléculaire aux échelles nanométriques jusqu'à l'imagerie, technique pour laquelle la France est particulièrement pionnière. Aujourd'hui la communauté a développé des techniques *in operando* combinant d'autres techniques permettant l'étude de systèmes complexes tels que des catalyseurs en phase homogène, des matériaux pour le stockage de l'énergie, ou des objets archéologiques. L'association nationale regroupant les utilisateurs de la RPE (ARPE) a permis de hisser la France en termes d'équipements au niveau de ses voisins européens, voire mondiaux offrant ainsi à la communauté des chercheurs français l'accès à des techniques de pointe (spectromètres & méthodologies) mais aussi à une expertise scientifique unique dans tous les champs disciplinaires. Cette structuration s'est également traduite par une amélioration du fonctionnement des laboratoires et de leurs liens et interactions, entre autres grâce au soutien de leurs tutelles (y compris le CNRS) en personnels techniques et chercheurs/enseignants chercheurs.

À court et moyen terme, il est important de souligner que des responsables scientifiques de nombreux laboratoires français ayant une expertise internationale reconnue en RPE vont partir à la retraite au cours de ces prochaines années, conduisant indéniablement à une fragilisation de l'ensemble de la communauté.

RMN-DNP. La spectroscopie RMN, parce qu'elle permet de sonder l'environnement local des atomes en chaque site, est un outil d'analyse incontournable pour de la recherche de pointe en chimie, en biologie, en médecine ou en physique. Ainsi les systèmes étudiés par RMN couvrent des domaines d'étude allant de petites molécules organiques dans des mélanges complexes à des polymères solides de plusieurs méga-daltons, de matériaux nano-structurés inorganiques ou hybrides à des biomolécules en solution ou en phase solide, de métabolites dans des fluides ou tissus biologiques à des organismes vivants, de l'imagerie du corps entier à la spectroscopie *in vivo* localisée.

Des avancées récentes en termes de méthodologie et d'instrumentation révolutionnent aujourd'hui cette spectroscopie et accroissent de manière inédite son potentiel pour lever des verrous analytiques clés. En particulier, l'introduction de champs magnétiques élevés, de sondes de rotation de l'échantillon à très haute vitesse, de séquences d'impulsions sophistiquées, de techniques d'hyperpolarisation bouleversent les horizons de cet outil en augmentant de façon considérable tout à la fois sa sensibilité et sa résolution.

E. Chimie et grandes installations de la recherche

La communauté des chimistes utilisant les grandes installations de la recherche est de plus en plus nombreuse. L'évolution permanente des sources accessibles permet des avancées dans de très nombreux domaines scientifiques et d'applications. Dernièrement, des résultats significatifs ont été obtenus en catalyse, électrochimie, structure, environnement, chimie analytique, dans le domaine du patrimoine, de la chimie-physique en phase gazeuse ou condensée, du domaine des agrégats et des nanoparticules, de la matière molle, des batteries, de l'imagerie 3D à l'échelle nanométrique.

Le Rayonnement Synchrotron offre de multiples possibilités aux chimistes : que ce soit avec des techniques d'absorption, de diffraction, de microscopie, de photoémission ou d'émission, les techniques développées sont en plein essor dans ces différents domaines. Des informations résolues en temps à la picoseconde et un gain très important en cohérence et brillance seront utilisables dès 2020 à l'ESRF et, on l'espère, bientôt à SOLEIL.

L'avènement récent des XFEL en Europe et dans le monde ouvre la voie à des expériences innovantes qui tirent parti de la brillance extrême et de la possibilité de réaliser des expériences résolues à la femtoseconde. Le développement de ce type d'expérience en

chimie permettra l'obtention de résultats à fort impact.

La communauté française utilisant la diffraction par les neutrons est en profonde mutation. L'ouverture d'ici quelques années de la source européenne à spallation (ESS) à Lund en Suède permettra des expériences impossibles jusqu'à maintenant. La fermeture du réacteur Orphée fin 2019 a signé la fin des expériences au Laboratoire Léon Brillouin (LLB), actuelle source nationale de neutrons. Notons qu'il n'existera donc plus de source nationale en 2020, la communauté française pouvant utiliser la source européenne située à Grenoble, L'Institut Laue Langevin (ILL).

F. Risques et atouts

Bien qu'elles soient par essence interdisciplinaires, la spectroscopie et la photochimie sont bien structurées au niveau national. On peut citer la Division Chimie Physique (DCP) qui fédère la communauté à travers plusieurs subdivisions comme la Spectroscopie Optique et Neutronique, le Magnétisme & la Résonance Magnétique ou encore la subdivision Photochimie, Photophysique et Photosciences. La présence de plusieurs GDR aide aussi à structurer les échanges au sein de la communauté. La spectroscopie et la photochimie possèdent également une forte visibilité internationale notamment grâce aux grandes infrastructures de recherche et au fort développement instrumental.

Malgré cette synergie positive, le renouvellement de la communauté n'est pas équilibré d'un point de vue thématique. Il a été souligné que le domaine de la RPE allait nécessiter, dans les années à venir, une attention particulière afin de conserver son expertise pour laquelle la France est reconnue. Cette difficulté de renouvellement est malheureusement aggravée par la chute constante des recrutements. Enfin, il convient de noter que l'aspect de plus en plus applicatif de nombreux projets et financements, ce qui est positif en soit, ne se trans-

forme pas à moyen terme en « prestation de services » et ne conduise à l'appauvrissement du savoir-faire fondamental et de développement instrumental de nos disciplines.

III. Electrochimie

Le rôle de l'électrochimie a été parfaitement exprimé par un « éditorial » du journal américain ACS Nano en 2016 : « *This is the golden age of electrochemistry. Never before has this discipline found itself at the nexus of so many developing technologies* ». Cette renaissance est, entre autres, due au fait qu'elle permet de contrôler très finement un grand nombre de processus, allant de l'analyse à la synthèse moléculaire ou de matériaux, de l'échelle macroscopique à l'échelle nanométrique. Les technologies appliquant l'électrochimie à des sujets liés à l'énergie, la déionisation capacitive de l'eau, les capteurs et les actionneurs électrochimiques font aussi l'objet d'une large exploration, et l'utilisation de méthodes électrochimiques pour la fabrication de composants électroniques, les revêtements et la synthèse de matériaux est plus importante que jamais. Le domaine est en train de devenir une priorité internationale et une abondance de fonds de recherche a été dégagée à l'échelle mondiale pour l'électrochimie appliquée. Bien que sa position soit centrale à de nombreux travaux de recherche et qu'il existe une communauté française très bien structurée, au travers notamment du groupe d'électrochimie de la Société Chimique de France, du groupe français de bioélectrochimie, ou de l'action motrice des GDR, du réseau RS2E et de l'organisation de conférences (ElecNano, Journées d'électrochimie...) on peut regretter qu'elle continue de souffrir en France, contrairement à d'autres pays, d'un manque de financements ciblés, si on fait abstraction des actions phares dans le domaine du stockage et de la transformation d'énergie.

A. Électrochimie moléculaire

Une grande partie des activités dans le domaine de l'électrochimie moléculaire est actuellement orientée vers, et stimulée par des enjeux d'énergies renouvelables ou des défis environnementaux. Que cela soit par exemple l'électrolyse ou la photoélectrolyse de l'eau afin de produire sans surtensions (et coûts) excessives de l'hydrogène, ou le recyclage du CO₂ en molécules utiles, les outils développés ces dernières années d'un point de vue expérimental et théorique sont devenus indispensables pour progresser par rapport à ces enjeux sociétaux. L'électrocatalyse moléculaire a fait des progrès considérables en ce qui concerne la compréhension des mécanismes réactionnels et par conséquent se focalise de plus en plus sur la prédiction et le *design* rationnel de structures ou édifices moléculaires plus efficaces et plus stables, souvent avec une philosophie biomimétique pour l'activation de petites molécules. L'immobilisation de biocatalyseurs ou de catalyseurs biomimétiques sur substrats semiconducteurs, capables de photosynthèse artificielle, est un axe à développer, conjointement avec les études sur le transfert d'électrons au sein de macromolécules biologiques. À l'échelle internationale on note aussi une certaine renaissance de l'électrosynthèse organique, à comprendre en partie dans le contexte des idées de développement durable, mais cette tendance n'est pas très suivie en France.

En termes de méthodologie, le couplage de l'électrochimie avec d'autres types de mesures continue à prospérer. Par exemple des activités combinant la stimulation photo- et électrochimique sont de plus en plus abondantes. Elles ouvrent des opportunités uniques vers des approches de double détection à des échelles de temps ultracourtes (nanosecondes) ou dans des espaces confinés.

Une approche développée ces dernières années est l'électrochimie bipolaire, avec des déclinaisons dans plusieurs domaines d'application, allant de la chimie des matériaux jusqu'aux actionneurs en passant par la chimie

analytique. Des chercheurs de la communauté française sont moteurs dans ce domaine en expansion et explorent les différentes opportunités uniques offertes par cette version « sans fil » de l'électrochimie.

B. Électrochimie et nanosciences

L'avantage unique de certains outils électrochimiques d'être miniaturisables presque à volonté confère à cette discipline un rôle important également dans le domaine des nanosciences. L'émergence récente de véritables nano-électrodes, permettant d'accéder à des mesures à des échelles ultimes, y compris à l'intérieur de cellules vivantes ou de synapses, constitue une avancée majeure. La structuration de l'interface électrode/électrolyte à l'échelle nanométrique voire moléculaire, reste une activité importante de la communauté française. Le greffage de monocouches moléculaires, de couches ultraminces de 2 à 20 nm d'épaisseur, multifonctionnelles, nanostructurées et souvent greffées de manières covalentes aux substrats est un thème qui continue à progresser en termes de versatilité des fonctions et qui impacte de nombreux domaines (électronique moléculaire, capteurs, électro- et photocatalyse). Les méthodes électrochimiques de modification de surfaces apparaissent dans bien des situations comme plus avantageuses que le dépôt de couche mono moléculaire par auto-assemblage car plus robustes. À une échelle légèrement plus grande, on peut mentionner aussi des travaux visant à élaborer des surfaces d'électrodes avec une porosité contrôlée afin de mieux maîtriser et optimiser leur activité, y compris l'impression d'informations moléculaires dans ces matrices à haute surface active. Les substrats ainsi obtenus ont une utilité dans pratiquement tous les autres domaines abordés dans ce rapport.

Notons également le développement du microscope électrochimique à balayage qui a permis ces dernières années l'étude de nano-

particules individuelles par la technique de nano-impact mais également les études de la réactivité électrochimique d'atome ou de molécule unique ainsi que la fabrication et l'étude de jonctions métal/molécule/métal impliquant moins d'une centaine de molécules redox actives ou la fabrication de commutateur atomique. Il est important de noter que l'électrochimie continue sa progression dans le domaine de l'électronique ou parmi les principales technologies de mémoires émergentes, les mémoires résistives basées sur des réactions électrochimiques localisées générant des filaments conducteurs dans des électrolytes solides à base d'oxyde ou de sulfure ou dans des électrolytes polymères sont considérés par l'ITRS (International Technology Roadmap for the Semiconductor Industry) comme susceptibles d'être commercialisées dans les cinq prochaines années. Rappelons ici que le remplacement des technologies mémoire actuelles (disque dur et mémoire flash) constitue un enjeu d'économie d'énergie majeur de nos sociétés numériques. Dans ce contexte, la compréhension des phénomènes redox dans des nanogaps de quelques dizaines de nanomètres séparant deux électrodes, au sein de nano-pores et d'une manière générale dans des milieux confinés est très certainement un enjeu important de la prochaine décennie.

C. Electroanalyse et bioélectrochimie

Le caractère particulier des phénomènes à l'interface électrode-solution et la diversité des approches électrochimiques autorisent un vaste champ d'applications dans le domaine de l'analyse. Bien qu'historiquement l'électrochimie permette d'utiliser à cette fin déjà plusieurs concepts complémentaires (potentiométriques, conductimétriques, voltampérométriques et ampérométriques), d'autres modes de transduction comme par exemple l'électrochimiluminescence (ECL) ou le cou-

plage avec des phénomènes de fluorescence ou le développement de transistors organiques à grille électrolytique parfois imprimés, se sont rapidement développés ces dernières années. Afin d'améliorer la sélectivité des électrodes, il est souvent nécessaire de procéder à une fonctionnalisation de la surface, soit par des récepteurs (artificiels ou biologiques) soit par des catalyseurs. De nombreux travaux sont actuellement en cours avec l'objectif d'une meilleure performance en termes de sélectivité, de limites de détection et de résolution spatiale ou temporelle. Au moins deux voire trois de ces critères sont ciblés simultanément par des travaux extrêmement intéressants concernant la détection de nano-impacts. Il s'agit de mesurer par voie électrochimique des événements de collision entre une nanoparticule unique et la surface de l'électrode, ce qui permet de déterminer avec une très grande précision sa composition, sa taille et dynamique. La communauté française est aussi active dans cette thématique en parallèle avec des contributions anglaises, néerlandaises, américaines etc. Bien qu'il s'agisse pour l'instant plutôt d'une activité académique, des applications potentielles existent déjà, dans le domaine de la pollution croissante de notre environnement par des nanoparticules. La tendance générale va à la sensibilité ultime, c'est-à-dire la détection électrochimique de la molécule unique. Certains travaux récents se sont aussi intéressés à la détection ou l'imagerie d'entités biologiques individuelles, telles que des cellules, par ECL, basés sur le développement d'une véritable microscopie ECL. Ce type de travaux ne peut pas être classé dans le domaine des biocapteurs habituels, mais sont susceptibles à long terme d'apporter des informations importantes pour le domaine médical. Dans ce contexte, notons l'émergence de travaux où de telles expériences sont couplées avec une approche d'électrochimie bipolaire, sous-domaine de l'électrochimie qui poursuit son évolution, notamment en ce qui concerne les applications analytiques.

De manière plus générale, l'interfaçage d'outils électrochimiques avec des entités biologiques, telles que les cellules, les mitochondries ou certaines protéines, reste un

domaine très dynamique avec plusieurs acteurs bénéficiant d'une visibilité au plus haut niveau international. Une nouveauté intéressante consiste à immobiliser des algues entières et ouvre un champ d'étude qui sera exploité ces prochaines années. Les outils basés sur des protéines membranaires isolées ou au sein de membranes lipidiques jouent un rôle important pour l'identification de mécanismes réactionnels cruciaux tels que la photosynthèse et la respiration. L'étude d'inhibiteurs de ces oxydoréductases, hydrogénases et d'autres protéines issues du métabolisme de bactéries pathogènes, permet l'identification des nouveaux antibiotiques. Une autre piste exploitée pour profiter des enzymes est l'utilisation de protéines issues de bactéries extrémophiles qui présentent une grande stabilité de températures et pHs.

L'interfaçage entre l'électrochimie et le vivant sert également à la production d'énergie électrique, basée sur l'immobilisation, soit d'enzymes, soit de microorganismes entiers sur la surface d'une électrode. Des biopiles enzymatiques ou microbiennes ont ainsi vu le jour et le spectre d'enzymes utilisables pour ce type de procédés a été considérablement élargi, tout en améliorant leur performance en termes de longévité et de puissance. Le verrou majeur reste la bio-compatibilité de ces dispositifs. Malgré cet obstacle, des résultats encourageants ont pu être obtenus par exemple avec des composants microélectroniques autonomes énergétiquement.

D. Stockage, transformation de l'énergie

Le développement des énergies nouvelles, l'essor des véhicules électriques et hybrides, la volonté de disposer de sources autonomes d'énergie électrique pour l'alimentation de petites centrales ou d'appareils portables dans divers domaines (microélectronique, santé, défense, sécurité, domotique, télécommunications, loisirs etc.) ont engendré d'intenses

travaux de recherche dans le domaine des générateurs électrochimiques.

D'énormes efforts ont été faits pour développer d'autres concepts électrochimiques de transformation de l'énergie. Par exemple, une activité qui gagne en visibilité au niveau international concerne les cellules redox à flux ou la poursuite active des recherches sur les catalyseurs et les membranes pour les piles à hydrogène ou encore le développement de systèmes de stockage basés sur des phénomènes capacitifs.

Ceci dit, les enjeux liés au stockage de l'énergie sont tellement importants et pressants qu'ils ont conduit durant ces dernières années à des innovations spectaculaires et applicables surtout au niveau des batteries. Elles concernent l'élaboration de nouveaux matériaux et l'émergence de nouvelles technologies de batteries attractives. Un déplacement du « curseur recherche » des matériaux vers l'électrochimie pure visant à améliorer les interfaces, qui sont le cauchemar de l'électrochimie, est anticipé. Le défi est de poids en raison de l'aspect dynamique des interfaces. C'est dans ce contexte que toutes activités de recherche visant à la fonctionnalisation des surfaces, à l'ingénierie des interfaces, au développement de techniques analytiques et d'outils de caractérisation *in operando* permettant d'en suivre leur évolution compositionnelle et morphologique seront plus importantes qu'elles n'ont jamais été dans le passé. Des efforts devront également être canalisés vers l'amélioration et le développement de techniques *in situ* de prospection des interfaces solide-liquide et solide-solide en temps et en espace. Enfin des modèles théoriques concernant les interfaces à un potentiel donné devront être améliorés. Toutes ces nouvelles recherches s'inscriraient parfaitement dans le prochain flagship Européen (Battery 2030) dont l'un des 3 piliers est lié aux interfaces et à leur amélioration via l'intelligence artificielle. L'électrochimie des interfaces réserve donc des challenges fondamentaux passionnants et par la même des opportunités multiples pour répondre aux demandes sociétales.

IV. Chimie analytique, radiochimie et chimie sous rayonnements

A. Chimie analytique

Les récents progrès de la chimie analytique ont permis l'accès à une information mieux résolue dans le temps et l'espace et à des limites de détection toujours plus basses. Seules ou couplées, ces techniques sont employées à relever les challenges analytiques actuels et futurs.

1. Chromatographie

Depuis l'apparition des pompes ultra haute pression sur les systèmes de chromatographie liquide, la chimie des colonnes sub-2 μm (taille des particules) a connu une véritable révolution contribuant à une meilleure résolution et une plus grande sélectivité. En effet, la séparation et la quantification restent les fondements majeurs de la chromatographie, maintenant appliquées à des échantillons toujours plus complexes constitués de plusieurs centaines voire milliers de composés. Dans certaines applications, plusieurs courants séparatifs cohabitent : (1) réduction du diamètre interne des colonnes associée à l'augmentation de la longueur de celles-ci vers une meilleure sensibilité par la résolution, (2) séparation multidimensionnelle en ligne ou découplée pour bénéficier de l'orthogonalité séparative des phases/techniques sélectionnées. L'évolution passe également par la miniaturisation, et de plus de solutions séparatives sont proposées dans un format « on-chip » ou micro-fluidique. Dans le cadre d'analyses complexes, la chromatographie en phase gazeuse propose maintenant une analyse multidimensionnelle de type GCxGC ou GC3 et/ou la combinaison de plusieurs détecteurs en série et en parallèle. En

complément, une autre tendance marquée est l'évolution vers une sensibilité plus élevée et des limites de détection inférieures qui permettent l'identification de plus de composants chimiques dans un même échantillon à des niveaux de traces ou d'ultra-traces.

2. Analyse inorganique, de spéciation et isotopique

La caractérisation inorganique a subi de fortes évolutions ces dernières années, notamment vers la détection en ultra-traces et la discrétisation de l'information, passant de l'analyse du contenu élémentaire à la connaissance de sa dissémination dans la matrice par imagerie. Ces approches permettent d'élargir les champs d'application notamment dans l'environnement et le vivant et d'affiner la connaissance de l'échantillon en illustrant son hétérogénéité.

La préparation de l'échantillon constitue actuellement le goulet d'étranglement de la dynamique d'analyse inorganique. Les techniques de minéralisation sous champs microondes n'ont que peu évolué et restent encore un formidable champ de développement. En revanche, les techniques d'introduction immédiate dans les détecteurs à ionisation par plasma induit faisant appel à l'ablation laser sont en très forte évolution, le passage des lasers nano- aux lasers femto-seconde induisant un gain de sensibilité et de reproductibilité ainsi qu'une moins grande dépendance de la longueur d'onde d'ablation. Il est ainsi possible d'obtenir une imagerie inorganique élémentaire, multi-élémentaire ou même isotopique avec une résolution spatiale de quelques microns.

Contrairement aux dix dernières années, on assiste à un renouveau des détecteurs inorganiques avec une simplification de l'instrumentation et une évolution des performances des détecteurs multi-élémentaires. La sensibilité de ces derniers permet maintenant, en fonction de leur géométrie, d'atteindre la détection en routine au niveau du ppt (ng/l) voire du ppq (pg/l). Ces excellentes limites de détection

ouvrent de nouveaux champs d'investigation dans l'environnement comme dans le vivant. La structure de ces détecteurs ICP/MS permet aussi de les coupler facilement aux chromatographies liquides ou gazeuses et d'élargir l'information inorganique en lui associant une formulation de spéciation ou bio-inorganique. Ces très fortes solutions analytiques questionnent maintenant en retour les réglementations en place et bousculent en particulier les domaines des cosmétiques et de l'agroalimentaire.

Enfin, on assiste à une démocratisation de l'utilisation des signatures isotopiques non traditionnelles liée à l'évolution des performances des ICP/MS à multicollecion, ce qui permet d'amener les nouveaux concepts de signatures d'origine ou aspects réactionnels en utilisant, quand les éléments le permettent, les signatures de fractionnement indépendant de la masse (MIF). La détection et mesure de précision à très faibles concentrations comme les couplages aux différentes chromatographies vont certainement entraîner une nouvelle vision des compréhensions et descriptions des cycles biogéochimiques des métaux dans l'environnement comme dans le domaine du nucléaire. On assiste donc à un renouveau des applications et du potentiel des analyses inorganiques, bio-inorganique et isotopique. L'imagerie et la discrétisation de l'échantillon se traduit aussi par une très grande génération de signaux et de données ce qui entraîne également une nouvelle logique d'exploitation et de gestion de ces données comme dans les autres champs des sciences analytiques.

3. La spectrométrie de masse

Ubiquitaire et omnipotente, la spectrométrie de masse se caractérise par la grande diversité des géométries d'appareillages disponibles. Ses principaux axes d'amélioration sont associés à la sensibilité, la résolution et la vitesse d'acquisition. Ces dernières années ont été marquées par le développement des analyseurs de type Orbitrap permettant un accès aux mesures de haute résolution en routine et avec une vitesse d'acquisition accrue.

L'introduction de la mobilité ionique permettant de distinguer les isomères géométriques, fournit une dimension séparative supplémentaire. La multiplication des modes de fragmentation alternatifs en basse et moyenne/haute énergie améliore les informations structurales. Les cellules ICR harmonisées ont permis une résolution multipliée d'un facteur dix des instruments de type FT-ICR (précision de quelques ppb). Ces avancées techniques, combinées à des développements méthodologiques et (bio)-informatiques, permettent d'appréhender l'étude d'échantillons de complexité toujours grandissante dans les sciences chimiques, environnementales, sciences de la vie, l'astrochimie ou encore le patrimoine culturel. En outre, la spectrométrie de masse tire les bénéfices de la multitude de géométries d'analyseurs existants pour se positionner aussi bien en analyses qualitatives ou structurales comme quantitatives, de la recherche fondamentale jusqu'au développement de molécules et leur valorisation dans le cadre d'activités industrielles. Protéines ou polypeptides jusque-là lysés pour en faciliter la caractérisation sont dorénavant étudiés intacts, pour limiter au plus les artéfacts induits par les phases de préparation. Parce que réunissant plusieurs classes de molécules (de grande variété de composition chimique et atomique, et de masse moléculaire) et s'intéressant à leur caractérisation et quantification quasi-exhaustive, la métabolomique concentre beaucoup d'attention dans les domaines appliqués en environnement ou en pharmaceutique/biosanté. Ces approches non ciblées permettent, dans des designs d'expérience où la préparation d'échantillon est maîtrisée, de fournir un instantané en temps réel de l'état de l'organisme étudié. Ces méthodes conçues à l'origine comme des outils de recherche académique ont de plus en plus d'application dans l'industrie. L'imagerie par spectrométrie de masse s'est également considérablement développée ces dernières années grâce aux techniques de désorption et d'ionisation MALDI ainsi que d'autres techniques d'analyse de surfaces solides (SIMS). Ces nouvelles solutions d'imagerie génèrent des cartographie 2D et 3D avec des résolutions latérales de l'ordre de 1-5 μm (50 nm pour nanoSIMS) et

peuvent maintenant être couplées à d'autres techniques afin d'envisager une approche multimodale.

B. Radiochimie & chimie sous rayonnements

Si le domaine d'application de la radiochimie premier reste lié au cycle du combustible électronucléaire, de nombreux autres champs d'investigation lui sont néanmoins ouverts, en particulier en sciences de l'environnement, sciences de la terre ainsi qu'en médecine et pharmacie.

La chimie sous rayonnement se concentre sur l'étude des effets des rayonnements ionisants sur la matière, qu'il s'agisse de dégâts d'irradiation dans des matériaux, ou des effets de radiolyse dans les solutions. Ces deux champs disciplinaires, bien qu'intimement liés, ont longtemps constitué des communautés distinctes. Un effort de rapprochement a néanmoins été entrepris au cours des dernières années, en particulier avec la création d'un GdR commun (SciNEE), la fusion des Journées Nationales de Radiochimie et des Journées d'Étude de la Chimie sous Rayonnement et la création d'une section «Chimie sous Rayonnement et Radiochimie» au sein de la division Chimie-Physique de la SCF.

1. Radiochimie

Les conséquences de l'accident de Fukushima, qui ont conduit à une nouvelle vague de défiance vis-à-vis de l'énergie électronucléaire et à son abandon programmé dans plusieurs pays occidentaux, ont incontestablement impacté les programmes de recherche dans le domaine au cours des dernières années. En parallèle, les questions soulevées en France par les débats autour de la transition énergétique et les retards accumulés du réacteur de 3^e génération (EPR) ont également contribué à un ralentissement des programmes

dédiés au développement des futures générations de réacteurs et des cycles du combustible associés. Ce handicap conjoncturel se conjugue aux difficultés structurelles historiques de la communauté, qui apparaît morcelée entre différents organismes de recherche (Universités, CNRS, CEA, IRSN...). La communauté académique est en outre constituée pour partie d'équipes de taille modeste, ce qui la pénalise en terme de visibilité et de rayonnement international. Les dernières années ont néanmoins marqué un effort important de structuration. Des liens se sont notamment tissés via le financement de projets structurants au sein du défi NEEDS (Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société) tandis que la création du GdR SciNEE a permis d'organiser les thématiques scientifiques abordées. On peut ainsi distinguer trois axes principaux.

Systèmes nucléaires et scénarios associés : largement pilotée par la communauté des physiciens de l'IN2P3, cette thématique vise à étudier les scénarios énergétiques associés à des cycles nucléaires alternatifs, tels que ceux à base de thorium. La contribution des radiochimistes y demeure indispensable afin de permettre l'obtention de données nucléaires de base (conception de cibles d'actinides), et d'entreprendre les études liées à la fabrication et au retraitement des combustibles.

Cycle du combustible : les problématiques liées aux cycles actuels et futurs demeurent toujours un enjeu fort. Si les aspects liés à la fabrication du combustible semblent aujourd'hui moins porteurs que par le passé, ceux relevant de son retraitement (dissolution, chimie séparative) sont actuellement l'objet de nombreux travaux et permettent d'établir des ponts avec la science des procédés hydro-métallurgiques envisagés pour la valorisation des métaux stratégiques (mine urbaine).

Radiochimie environnementale, radioécologie : la mesure de radionucléides à l'état de traces dans des matrices complexes ainsi que l'étude de leur migration vers la biosphère et de leur interaction avec le vivant apparaît aujourd'hui comme un élément indispensable à un débat sociétal apaisé autour de l'utilisation de l'énergie nucléaire. La radiochimie environ-

nementale constitue ainsi un domaine d'intersection entre radiochimie et chimie de l'environnement, et apparaît donc comme une forte source d'interdisciplinarité. Dans ce cadre, la Zone Atelier Territoires Uranifères a notamment permis d'initier plusieurs projets regroupant chimistes, géologues, biologistes, et sociologues.

D'autres thématiques restent abordées par la communauté. La radiopharmaceutique a ainsi vu un développement important de la théranostique, qui vise à l'utilisation d'isotopes uniques pour le diagnostic et le traitement de tumeurs. Il faut en outre noter le rôle croissant joué par la chimie théorique dans le design des molécules vectrices, en permettant une approche prédictive de la stabilité de complexes impliquant des radionucléides de courte durée de vie. Les défis liés au démantèlement des centrales nucléaires constituent également une thématique émergente et nécessiteront le développement de solutions innovantes pour la décontamination.

2. Chimie sous rayonnement ionisant

L'étude de la Chimie sous Rayonnement peut être divisée en deux axes principaux. Le premier repose sur l'étude du comportement sous irradiation de matériaux d'intérêt pour le cycle électronucléaire, dont en premier lieu le combustible et les matériaux de structure présents au sein du réacteur, mais également les matrices envisagées pour le confinement de certains radionucléides. Un effort particulier est actuellement porté sur l'étude de la nature des défauts induits par irradiation : à ce titre, des techniques innovantes telles que la spectroscopie d'annihilation de positons, sont développées, et on peut noter le rôle croissant joué par les méthodes de simulation numérique. Les études sur les combustibles irradiés réels demeurant difficiles à mettre en œuvre, la question de la représentativité d'irradiations externes aux ions et/ou aux électrons est également posée. Enfin, il est important de noter que le comportement des matériaux est de plus en plus abordé à travers le couplage de plu-

sieurs contraintes, i.e. radiative/mécanique ou radiative/chimique.

En parallèle, de nombreuses équipes poursuivent des études de radiolyse afin de mettre en évidence les mécanismes complexes gouvernant les interactions rayonnement-molécule dans divers milieux. Ces travaux trouvent bien sûr un écho dans le cadre du cycle du combustible nucléaire, en particulier lors de son recyclage où la dégradation des molécules extractantes et l'évolution du milieu (acide nitrique concentré) doivent être abordées avec soin. De nombreuses études se déroulent également à l'interface avec les sciences du vivant : la radiolyse, par sa compréhension fine des mécanismes à l'œuvre lors de l'interaction rayonnement ionisant/molécules d'intérêt biologique, notamment aux échelles de temps courts, et plus généralement sur des gammes temporelles très étendues, devrait permettre de poursuivre les avancées réalisées dans ce domaine. Enfin, la radiolyse permet de simuler efficacement et de manière accélérée les processus de vieillissement à l'œuvre dans des systèmes d'intérêt pour les énergies renouvelables (batteries...). Elle permet en outre d'accéder à des données résolues en temps, et donc de proposer des mécanismes réactionnels sur des échelles de temps variées allant de la picoseconde à la journée.

Toutes ces expériences nécessitent un panel étendu de résolutions temporelles. La plus grande résolution temporelle actuellement accessible en France est celle de la picoseconde, mais de meilleures résolutions (sub-picoseconde et femtoseconde) permettraient de mieux comprendre les tous premiers instants de l'interaction rayonnement ionisant/matière, notamment dans le cas de solutions concentrées par exemple. Enfin, le couplage des rayonnements ionisants avec différentes techniques d'analyse comme la spectroscopie Raman, la résonance paramagnétique de l'électron, la conductivité ou l'électrochimie, sur des gammes de temps variées, devrait également donner accès à davantage d'information sur l'évolution des systèmes sous rayonnement en fonction du temps.

Conclusion

Nous espérons avoir convaincu par ce rapport que la physico-chimie, qui est au centre de la section 13, reste une discipline très active et est surtout une discipline d'avenir.

Tout en adressant des aspects fondamentaux des phénomènes, elle aborde des sujets sociétaux qui prennent de plus en plus d'importance, notamment ceux relevant de l'énergie, du patrimoine, des analyses chimiques en générale et de leurs retombés en chimie environnementale. De ce fait, l'aspect interdisciplinaire de la physico-chimie ne concerne pas seulement notre communauté mais renforce les liens avec d'autres disciplines extérieures à la chimie.

Le fort aspect applicatif des thématiques scientifiques des physico-chimistes ne doit toutefois pas faire oublier ou affaiblir l'expertise fondamentale et expérimentale qui permet à la France d'être reconnue dans ce domaine sur le plan international. La physico-chimie subit de profondes évolutions d'une part en raison des nouvelles techniques expérimentales et d'autre part par les nouveaux concepts qui s'y développent, ces derniers en relation avec d'autres domaines bien au delà de la chimie. On peut citer l'apparition et le développement du « machine learning » qui illustre bien les bouleversements à venir à la fois dans la mise en place de nouveaux concepts dans la manière de concevoir une expérience. Le renouvellement continu de la communauté qui doit être régulier et planifié sur le long terme, reste un point clé pour maintenir le niveau international de la physico-chimie. On ne peut évidemment occulter les conséquences de la baisse du nombre de recrutement des chercheurs et enseignant-

chercheur qui non seulement affaiblit le potentiel humain mais également l'attractivité pour les métiers de la recherche dont souffre les carrières scientifiques autour de la chimie. D'autres sources de difficultés existent lorsque l'on considère les domaines de la section 13. Le recrutement des chercheurs est directement lié à la formation de jeunes docteurs et de leur formation au sein des universités françaises et étrangères. Un changement important a eu lieu ces dernières dix années, avec la perte des masters spécialisés comme par exemple en chimie physique théorique (master national) ou en électrochimie (Paris, Grenoble) et la création de masters avec une formation large en chimie physique dans toutes les universités. En même temps, une internationalisation des candidats au niveau master et doctorat avait eu lieu. Le financement des stages masters a induit d'autres biais car une partie importante des étudiants de master se dirigent vers des laboratoires développant une recherche plus appliquée et qui possèdent des possibilités de financement de stage plus importantes grâce à des ressources contractuelles. Ceci contribue à affaiblir mécaniquement la recherche fondamentale en chimie physique. Pour ces projets, le recrutement se fait majoritairement à l'étranger.

Certaines communautés sont plus impactées car les jeunes étudiant.e.s formé.e.s se dirigent préférentiellement vers d'autres métiers que les carrières académiques. Par exemple, les étudiants de master et doctorants en radiochimie ou en chimie analytique ont la possibilité d'intégrer l'industrie, souvent avant la thèse et le nombre de jeunes docteurs intéressés par une activité en recherche est de fait assez faible. Ceci pose le problème de l'attractivité des métiers de la recherche, problème qui dépasse largement le périmètre de la section.

ANNEXE 1

Sigles employés dans le rapport.

LED : Light-Emitting Diode	TD-THz : Time-Domain TeraHertz
OLED : Organic Light-Emitting Diode	RPE : Résonance Paramagnétique Électronique
STED : Stimulated Emission Depletion	RMN : Résonance Magnétique Nucléaire
PALM : Photo-Activated Localization Microscopy	DNP : Dynamic Nuclear Polarisation
STORM : Stochastic Optical Reconstruction Microscopy	DNP MAS : Dynamic Nuclear Polarisation Magic Angle Spinning
NP : nanoparticule	ESRF : European Synchrotron Radiation Facility
SERS : Surface-Enhanced Raman Scattering	XFEL : X-ray Free-Électron Laser
SEIRAS : Surface-Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy	ESS : European Spallation Source
TERS : Tip-Enhanced Raman Spectroscopy	DFT : Density Functional Theory
AFM : Atomic Force Microscopy	QM/MM : Quantum Mechanic / Molecular Mechanic
ADN : Acide DéoxyriboNucléique	ATP : Adénosine-TriphosPhate
IR : Infra-Rouge	ADN : acide désoxyribonucléique
QCL : Quantum Cascade Laser	GPU : Graphics Processing Unit

SECTION 14

CHIMIE DE COORDINATION, CATALYSE, INTERFACES ET PROCÉDÉS

Composition de la section

François OZANAM (président de section), Simon TRICARD (secrétaire scientifique), Fannie ALLOIN, Dominique ARMSPACH, Christine CANAFF, Yann CHEVOLOT, Samuel DAGORNE, Louise DUHAMEL, Florence EPRON, Christophe GEANTET, Hazar GUESMI, Jean-François GUILLEMOLES, Jean-Cyrille HIERSO, Abdellaziz JOUAITI, Myrtil KAHN, Jean-François LAMONIER, Dominique LORCY, Paola NAVA, Elsie Alessandra QUADRELLI, Antoine SEYEUX, Arnaud TRAVERT.

Résumé

Les disciplines représentées en Section 14 s'articulent autour de la chimie de coordination, de la chimie organométallique, de la catalyse homogène ou hétérogène, de la chimie et physico-chimie des surfaces et des interfaces et de leur réactivité, de l'électrochimie, ainsi que des procédés de transformation de la matière. Ce rapport de conjoncture dresse un état des lieux de l'activité scientifique des laboratoires et des chercheurs qui la constituent, de leur répartition géographique, de la structuration des équipes et des moyens, et de leur évolution. Le positionnement des activités de la section dans le contexte international met en évidence une dynamique autour de certains champs thématiques couverts par la section, ainsi que des disciplines en difficulté, plus éloi-

gnées des grands défis sociétaux. Cette analyse se conclut par quelques recommandations notamment pour soutenir et favoriser les approches originales et les socles fondamentaux sur le long terme.

Introduction

Les chercheurs et chercheuses, enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs rattachés à la section 14 explorent différents champs de recherche sur la base d'une expertise principalement située dans de grands domaines disciplinaires de la chimie : la chimie de coordination,

la chimie organométallique, la catalyse (homogène ou hétérogène) et les procédés de transformation de la matière, la chimie et physico-chimie des surfaces et des interfaces, et l'électrochimie. À partir de ces compétences de base se développent recherches fondamentales ou appliquées. Ainsi, la section porte une vision large, conceptuelle et généraliste qui a permis de développer une relation étroite avec les entreprises, particulièrement dans les domaines de la catalyse, des générateurs électrochimiques et de la corrosion.

Les recherches et les champs disciplinaires explorés par les équipes de la section 14 ne sont pas strictement confinés au périmètre de la section. Des thématiques sont partagées avec l'ensemble des autres sections de l'institut de chimie, et plus marginalement avec des sections d'autres instituts, par exemple en ce qui concerne les grands instruments. Ainsi, lors des derniers concours, la moitié des candidates et candidats à un poste CR postulaient dans au moins une autre section (ou commission interdisciplinaire), comme environ un sixième des candidates et candidats à un poste DR.⁽¹⁾ Les frontières communes les plus notables sont celles avec la section 12 (chimie organométallique, catalyse homogène), la section 13 (chimie théorique, physico-chimie des surfaces et électrochimie interfaciale) et la section 15 (électrocatalyse et matériaux pour la conversion et le stockage de l'énergie, matériaux moléculaires). Des thématiques sont aussi partagées avec la section 11 (assemblages supramoléculaires, activation des réactions de polymérisation), et avec la section 16 (sondes multimodales pour l'imagerie et la théranostique, complexes organométalliques dans le traitement de différentes pathologies, étude de la réactivité des métalloprotéines).

Les nombreuses interfaces que la section entretient avec les autres champs thématiques traduisent les besoins de plus en plus exigeants que rencontrent les équipes pour comprendre et exploiter la réactivité des interfaces et des métaux, en particulier les métaux de transition, et leurs oxydes. Il se crée ainsi des axes d'expertise largement transverses à la section, qui dépassent même ses contours : tirer parti

ou exalter les réactivités, comprendre les systèmes au sein de leur environnement, construire des agencements de plus en plus précis et à plus grande échelle (ligands, assemblages supramoléculaires, matériaux multifonctionnels, nanoparticules, métaux ultra-dispersés, oxydes de porosités hiérarchisées) et étudier leurs propriétés. Ces objectifs nécessitent de relever des défis scientifiques difficiles : modélisation théorique et numérique à toutes les échelles de la matière (moléculaire, nanométrique, supramoléculaire et solide) et dans différents environnements (gaz, liquides, interfaces et systèmes multiphasiques), optimisation et contrôle des sites réactionnels, caractérisation en conditions opérationnelles. Ils tiennent compte d'enjeux contemporains essentiels : l'exploration et l'optimisation de la réactivité d'éléments abondants et peu exploités, de composés bio-sourcés, l'utilisation de nouvelles sources pour la transformation de la matière ou de l'énergie, le développement de procédés respectueux de l'environnement, l'élaboration d'outils de diagnostic et de thérapie médicale, précis, efficaces et ciblés. Ces exigences conduisent à des pratiques communes qui dépassent là encore le strict cadre de la section. Il peut s'agir de combiner des approches expérimentales avec des approches computationnelles et théoriques, d'avoir recours de plus en plus fréquemment aux grands instruments pour les études en environnements complexes ou exigeants, de rechercher des architectures multifonctionnelles, etc. L'ouverture à des approches interdisciplinaires est donc un élément fédérateur tout en permettant des approches diversifiées et fructueuses d'enjeux communs.

Le contour actuel de la section 14 permet de construire la vision large qui vient d'être évoquée autour de la chimie de coordination, de la chimie des surfaces et de la réactivité des interfaces et des métaux de transition. La section souhaite donc le maintien de son périmètre actuel : dans l'évaluation comme dans les pratiques quotidiennes des équipes, cette vision permet en effet d'élargir les perspectives disciplinaires et de rendre les approches plus fructueuses.

I. Évolutions depuis le précédent rapport, thèmes émergents

L'évolution des thèmes et des objets d'étude abordés par la section 14 est largement stimulée par la recherche de solutions aux grands défis énergétiques, environnementaux et de santé auxquels nos sociétés sont confrontées. Aussi, la période écoulée depuis le dernier rapport de conjoncture a vu s'amplifier les recherches liées à ces questions, à tous les niveaux. Ces évolutions et les thèmes de recherche émergents sont particulièrement mis en avant dans les projets présentés par les candidates et candidats aux concours CR et DR relevant de la section.

Ces recherches visent notamment à développer de nouvelles méthodes de synthèse, tant pour des objets d'étude spécifiques à la section (catalyseurs, édifices et matériaux moléculaires, matériaux fonctionnels, etc.) que pour les produits d'usage visés (vecteurs énergétiques, commodités, principes actifs, etc.), en utilisant une chimie plus verte, biosourcée et parfois bio-inspirée. L'utilisation d'éléments moins toxiques et/ou plus abondants, notamment en remplaçant les métaux nobles par des éléments de transition de la première rangée, des métaux du groupe principal, voire des oxydes, est largement menée. La mise en œuvre de réactions dans des milieux non usuels peu toxiques (milieu aqueux, CO₂ supercritique, liquides ioniques) ou à l'état solide (mécanochimie), susceptibles aussi de faciliter le recyclage de catalyseurs ou d'éléments critiques, est devenue une contrainte largement intégrée par la communauté.

Il importe également que ces objets opèrent dans des conditions plus douces, à des températures plus basses par exemple, tout en présentant des performances améliorées, par exemple pour l'activation de liaisons peu réactives. Ces exigences conduisent à développer de nouvelles stratégies pour organiser les objets à toutes les échelles : atomique (ultra

dispersion des métaux, catalyseurs à site unique), moléculaire (utilisation de ligands non innocents, formation de paires de Lewis frustrées, contrôle de la sphère de coordination des métaux par confinement dans des cages moléculaires, édifices moléculaires ou supramoléculaires complexes), nanométriques (encapsulation, matériaux architecturés, hiérarchisation de la porosité, nano-confinement, assemblages supramoléculaires, nano-réacteurs, enzymes ou modèles d'enzymes, nanoparticules bi- et multi-métalliques ou coeurs-coquilles), micro/millimétrique (micro fabrication, composites, réacteurs structurés) et *in fine* permettre le développement de procédés innovants. Par ailleurs, les méthodes non-thermiques d'activation de réactions sont des sujets d'études en forte progression, aussi bien pour la synthèse de composés que pour leur réactivité : réaction sous ultra-sons, sous irradiation lumineuse (activation plasmonique, excitonique), sous champs magnétiques (hyperthermie), etc.

Enfin, les dernières années ont vu l'accroissement des efforts concernant l'exploitation des matériaux bidimensionnels, tridimensionnels, lamellaires ou à base de couches minces ou de dispersions, pour leur fonctionnalisation et leur utilisation au sein d'applications variées : matériaux composites, détecteurs et capteurs, laboratoires sur puces, technologies environnementales, technologies biomédicales, stockage et conversion de l'énergie. Il s'agit le plus souvent de tirer parti des propriétés spécifiques d'éléments de basse dimensionalité, et de les combiner à d'autres éléments pour conférer aux objets ainsi construits sélectivité, efficacité et durabilité, optimiser la performance en minimisant le volume de matière active, multiplier les fonctions disponibles au sein d'un même dispositif.

Toutes ces avancées sont possibles grâce au développement d'outils expérimentaux et théoriques performants et à leur utilisation pour l'étude des mécanismes réactionnels et des propriétés physico-chimiques des objets d'intérêt, dans des conditions réalistes. Ainsi, la période qui vient de s'écouler s'est caractérisée par un développement significatif des

techniques *in-situ*, au voisinage de la pression ambiante ou en conditions opérationnelles (*operando*) et une convergence croissante des défis théoriques liés à la description des systèmes complexes et à la rationalisation de leurs propriétés. Les développements de la spectroscopie et de la microscopie environnementale et/ou en milieux liquides permettent d'accéder à des résolutions spatiales ou temporelles élevées. Les approches théoriques se développent dans la même direction, tant en termes de méthodes que de puissance de calcul, permettant de fournir une précision proche de l'expérience, les rendant quantitativement prédictives pour des systèmes de plus en plus complexes. Fréquemment combinées avec l'expérience, les études théoriques s'efforcent d'utiliser des modèles de plus en plus élaborés, d'inclure l'environnement immédiat (interfaces gaz/liquides, solvants) et de relier les échelles de temps et d'espace caractéristiques des objets étudiés. Dans ce cadre, les études multi-échelles ou d'apprentissage automatique connaissent un grand engouement.

Les applications visées concernent d'une part les enjeux liés au développement durable : combustion des COV et dépollution, production d'hydrogène, activation et conversion de petites molécules (CO₂ en produits d'intérêts, photosynthèse artificielle), remplacement d'éléments critiques ou toxiques, valorisation de la biomasse (en produits à haute valeur ajoutée, biocarburants, gaz de synthèse), piles à combustible, batteries ou électrolyseurs pour la conversion et le stockage d'énergie à basse et haute température, conversion photovoltaïque, etc. D'autre part, de nombreuses applications nécessitent des matériaux aux propriétés (optiques, magnétiques, électriques) nouvelles ou émergentes, voire multiples, liées à des effets de commutation ou modulables, notamment par des stimuli externes, en vue d'applications de haute technologie (informatique moléculaire ou quantique, capteurs, imagerie médicale, etc.).

De façon plus prospective, on peut enfin mentionner que quelques projets portent une ambition qui nécessitera l'ouverture à de nouvelles communautés. C'est le cas de projets

envisageant l'exploitation de bases de données massives, par exemple pour une meilleure prédiction de la réactivité en catalyse. Indépendamment des défis scientifiques qu'il faudra surmonter pour l'exploitation intelligente de telles bases, un premier défi consistera à construire les bases elles-mêmes, à partir de descripteurs appropriés et suivant des modalités exploitables.

II. Les grands domaines thématiques de la section

Une vision synthétique sommaire de la façon dont les membres de la section 14 présentent leurs activités a été obtenue en analysant les comptes rendus annuels d'activité (CRAC) des membres de la section 14 sur les cinq dernières années. Elle est illustrée par la Figure 1 qui présente les termes les plus utilisés par ces chercheurs et chercheuses pour présenter les points forts de leur recherche.⁽²⁾ Au-delà de cette première approche, une analyse plus précise des activités de la section s'impose.



Figure 1: Nuage de mots issu de l'analyse statistique des CRAC des chercheuses et chercheurs rattachés à la section 14. La taille des mots est proportionnelle au nombre d'occurrences.

Les *complexes et matériaux moléculaires* sont issus de l'association d'une ou plusieurs briques moléculaires aux propriétés bien définies. Les domaines d'applications de ces objets sont nombreux et aspirent à répondre aux besoins croissants pour le stockage et la transmission de l'information, l'énergie, l'environnement et la médecine (traitements thérapeutiques et outils de diagnostic). Le choix des molécules associées repose sur les propriétés des précurseurs utilisés qui peuvent ou non interagir au sein des édifices *via* des interactions supramoléculaires (liaison hydrogène, liaison halogène, interactions pi-pi, etc.). La grande variété des objets moléculaires utilisés, la diversité et le contrôle des interactions permettent de développer des complexes et des matériaux fonctionnels pour l'électronique (transport de charges, de photons, conversion photovoltaïque, transistors, capteurs, mémoires...), l'optique (détection, affichage et stockage de l'information...), le magnétisme (détecteurs de pression avec des matériaux à transition de spin...). L'ingénierie moléculaire, supra-moléculaire et cristalline, la compréhension des relations structure / propriétés, à l'échelle moléculaire et à celle des matériaux macroscopiques, impliquent une interaction forte avec la physique de la matière condensée pour les mesures des propriétés, ou avec la chimie théorique pour des modélisations (*ab-initio*, DFT, dynamique moléculaire, etc.), parfois prédictives. L'auto-organisation contrôlée de précurseurs selon une approche d'ingénierie moléculaire permet d'élaborer des matériaux avec une nanostructuration mono-, bi- ou tri-dimensionnelle comme par exemple les HOF (Hydrogen-bonded Organic Frameworks) et les MOF (Metal Organic Frameworks) ou PCP (Porous Coordination Polymers), qui présentent un intérêt majeur en catalyse et en adsorption. Par ailleurs, les parallèles avec des systèmes issus du vivant permettent de mettre au point des complexes ou assemblages supramoléculaires fonctionnels, des matériaux hybrides bio-inspirés ou de comprendre des mécanismes biologiques. Une évolution forte vers des objets multifonctionnels mettant en œuvre au moins deux propriétés telles qu'optique-magnétique, optique-mécanique, électrique-magnétique, optique-optique

(luminescence / optique non-linéaire) ouvre un large spectre d'applications. On peut citer des applications en biologie ou en imagerie ou encore des exemples de modulation de propriétés électriques, magnétiques, optiques, grâce à la présence d'entités activables par des photons ou des électrons, par exemple des électro- et photocatalyseurs ou des interrupteurs moléculaires photo- ou électroactivables. Les modélisations appuient les avancées expérimentales, en s'intéressant aux propriétés des états électroniques excités et, plus généralement, à l'interaction de la matière avec des stimuli extérieurs (lumière, température, potentiel) et/ou à des propriétés dynamiques (exemple : transport électronique dans les matériaux). Le développement futur de la plupart des matériaux moléculaires avec des visées applicatives nécessite leur mise en forme pour élaborer des dispositifs utilisables. Le contrôle de la croissance de ces matériaux permet une mise en forme par voie chimique, par exemple sous forme de nanoparticules ou de couches minces. La fonctionnalisation de surface par différentes techniques, greffage covalent, CVD, ALD est aussi une évolution majeure du domaine.

Des évolutions fortes vers de nouvelles réactions, de nouvelles sélectivités, et de nouveaux modes d'activation sont constatées en *catalyse homogène* sur la base de la nature des métaux, avec une approche conceptuelle à partir de la chimie de coordination et de la réactivité propre des métaux. Comme attendu, la recherche d'une chimie plus propre et durable a conduit au développement de réactions plus économes en atomes. Par exemple, l'activation de liaisons C-H sur des substrats les plus divers s'est popularisée ces trois dernières décennies pour contourner des fonctionnalisations intermédiaires plus polluantes, et éviter le recours à des réactions impliquant des liaisons plus faibles C-E (E = électrophile tel que B, Sn, Zn, etc.). D'autres réactions telles que les hydro-élémentations d'insaturés, également économes en atomes, font aussi l'objet de nombreux travaux. Cette approche d'abord basée sur des métaux relativement rares et coûteux (Ru, Rh, Pd, Ir, Pt, etc.) s'étend aujourd'hui aux métaux de transition 3d de la première ligne (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, etc.), plus abondants, ainsi qu'à d'autres

éléments longtemps supposés inertes ou au contraire trop réactifs (Au, Ca, Ba, Ga, etc.). Le développement de ces réactions de catalyse homogène repose sur la conception de ligands hétéroatomiques (N, O, Si, P, S, etc.) ou carbéniques (NHC en particulier) dont les structures toujours plus élaborées (cavitands, polydentés, etc.) autorisent des modes d'activation coopératifs originaux (ligands non-innocents, amphiphiles, paires de Lewis, etc.). Les approches mécanistiques combinant l'expérimentation, la modélisation et le calcul se sont largement généralisées, en particulier pour l'élucidation des mécanismes de cycles cinétiques ou de l'isolement d'intermédiaires réactionnels.

Ces dernières années, en *catalyse hétérogène*, la prise de conscience des enjeux liés au réchauffement climatique et à l'utilisation des ressources fossiles a conduit la communauté à orienter ses recherches vers la valorisation (i) des bio- ou agro-ressources, avec notamment l'exploration de nouvelles filières de molécules plateformes (plateformes furanique ou phénolique, sucres, etc.) issues notamment de lignocellulose, (ii) des sous-produits d'un procédé ou encore (iii) d'autres sources de carbone (CO₂, biogaz, déchets, etc.) *via*, notamment, les gaz de synthèse. Ces recherches visent aussi à substituer un procédé polluant par un procédé catalytique plus respectueux de l'environnement. Les domaines d'application visés concernent la ressource énergétique (biocarburants, filière hydrogène) ou l'industrie chimique. Ces filières posent des défis renouvelés tels que la caractérisation des matrices complexes non conventionnelles, leur activation ou la compréhension des phénomènes de désactivation. Les voies thermochimiques sont les plus explorées mais ces dernières années ont vu émerger l'utilisation de méthodes d'activation non thermiques (sonochimie, plasmas froids, microondes, promotion électrochimique, photo(électro)catalyse, etc.) parfois couplées à l'adsorption ou encore de nouvelles méthodes de conversion (procédés hétérogènes monotopes, catalyse tandem). Par ailleurs, les performances des procédés de dépollution ou de post traitements doivent également être accrues pour convertir en molécules non polluantes (N₂, CO₂, etc.) des mélanges plus com-

plexes ou des mélanges composés de polluants à l'état de traces ou émergents, de sources mobiles ou fixes, dans l'air ou dans l'eau, tout en obéissant aux nouvelles normes. Quelle que soit l'application, ces nouveaux défis nécessitent souvent le développement de nouvelles formulations de catalyseurs dans leurs textures (porosité hiérarchisée, etc.), leurs compositions, leurs propriétés de surface, de multifonctionnalité, de durabilité, en tenant compte des contraintes imposées par la criticité de nombreux éléments. Ces réorientations sont à l'origine de nouvelles thématiques sur des méthodes vertes ou durables de préparation de catalyseurs, ou vers le contrôle à l'échelle atomique de la dispersion, de la composition et de la localisation des sites actifs. Dans une étape ultime, l'impact de la mise en forme des catalyseurs est maintenant considéré. Tous ces défis ont conduit à l'émergence de domaines de recherche tels que l'étude de la réactivité ou de la synthèse de matériaux dans de nouveaux milieux réactionnels (eutectiques profonds, liquides ioniques, solvants supercritiques...). De nouveaux progrès technologiques (NAP-XPS, ETEM, RMN haut champ et hyperpolarisée, etc.) ou de nouveaux couplages de techniques physico-chimiques facilitent l'observation des catalyseurs dans les conditions réactionnelles avec des résolutions spatiales ou temporelles multiéchelles adaptées aux phénomènes à observer (dynamique rapide ou désactivation lente, résolution atomique ou à l'échelle d'un grain). Cet effort concernant les techniques couplées est concomitant avec les efforts de caractérisation des surfaces et interfaces (spectroélectrochimie, spectroscopies non linéaires, spectroscopies à sonde locale, imagerie et tomographie). Là encore, les approches *in situ* et *operando* permettent d'apporter des éclairages originaux et pertinents sur les mécanismes aux interfaces.

Le dialogue entre théoriciens et expérimentateurs est de plus en plus riche et la *chimie théorique* devient un maillon essentiel du développement de futures réactions catalytiques (prédiction et compréhension). La compréhension de la réactivité aux interfaces est cruciale dans tous les domaines de la catalyse, homogène et hétérogène, la maîtrise et le

contrôle des interfaces étant indispensables à l'amélioration des performances des dispositifs aujourd'hui développés à l'échelle industrielle. Qu'elles impliquent des complexes moléculaires en interaction avec un solvant, des matériaux poreux ou des nanoparticules soumis à un gaz, les interfaces catalytiques sont le siège de réactions chimiques. Elles nécessitent une bonne description atomistique de l'interface (géométrie moléculaire, morphologie des particules, surfaces, taille des pores...), de la variété des sites actifs (défauts, sites possédant un caractère acide ou base de Lewis/Brønsted, etc.), des espèces présentes en surface (co-adsorbats, traces d'eau, etc.) et surtout des effets de l'environnement et des stimuli extérieurs (solvant, gaz, température, pression, lumière, champ magnétique, potentiel électrique...) qui peuvent modifier de manière significative les grandeurs thermodynamiques et cinétiques des réactions. Évaluer ces paramètres au niveau atomistique est un prérequis pour aborder de manière statistique les mécanismes réactionnels à plus grande échelle. L'identification des intermédiaires de surface et des mécanismes de réaction et le développement de relations d'échelle à partir de ces intermédiaires doivent permettre de bien décrire le processus catalytique et d'en déduire des tendances « universelles » pour concevoir de nouveaux catalyseurs plus actifs. Des approches apparentées commencent aussi à se mettre en place au niveau des procédés, avec le développement de microréacteurs, la recherche de descripteurs pertinents et des approches combinatoires annonçant un recours ultérieur à l'intelligence artificielle.

L'approche associant synthèse et modélisation est de plus en plus utilisée en catalyse, dans l'étude des clusters, des colloïdes, des nanoparticules et des surfaces réactives. Les disciplines dévolues à l'étude de la matière sous forme nanoscopique (nanocatalyse) font le lien entre état moléculaire et état solide (du concept d'orbitales à la théorie des bandes), permettant de construire des ponts conceptuels de plus en plus nombreux et solides à la frontière entre catalyse homogène et catalyse hétérogène. Il en est de même pour la chimie organométallique de surface pour laquelle les

développements analytiques sont en pleine expansion. On assiste donc à une convergence de tous les domaines de la catalyse, tant au niveau de concepts très fondamentaux (mécanismes des réactions élémentaires de surface, nature des sites actifs à l'échelle atomique, confinement...) que des enjeux de société motivant des relations étroites avec les acteurs industriels nationaux ou internationaux. Cette convergence s'illustre aussi par l'apparition de nouveaux modes de divulgation, qui ont vu naître ou croître en notoriété des journaux spécialisés à forte audience et fort impact, qui incluent de plus en plus l'ensemble des thématiques de la catalyse, homogène et hétérogène.

On retrouve les mêmes convergences méthodologiques et conceptuelles pour l'élaboration et la synthèse, la caractérisation et la modélisation dans les recherches portant sur *les interfaces et l'électrochimie*. Les approches fondamentales permettent de lier les performances aux propriétés fonctionnelles des matériaux et au contrôle des interfaces. Leurs visées applicatives concernent l'énergie, l'environnement, le développement durable, la santé et la qualité de l'eau et des aliments (générateurs électrochimiques – batteries, piles à combustible, batteries à flux redox –, cellules photovoltaïques, capteurs, production d'hydrogène par électrolyse haute et basse température, dispositifs associés à la biologie – bio-puces, bio-capteurs, bio-piles, laboratoires sur puce, implants –, etc.). Les recherches sont particulièrement actives dans les domaines des nanomatériaux pour la vectorisation et comme agents de contraste, des conducteurs ioniques et électroniques, de l'électrocatalyse et de la photoélectrochimie pour la production d'hydrogène et la valorisation du CO₂. Dans ce cadre, sont synthétisés des matériaux fonctionnels ou architecturés (architecture 3D ou 2D), des couches minces comprenant des surfaces fonctionnelles permettant, entre autres, le greffage de molécules actives. Comme pour les autres champs couverts par la Section 14, les objectifs sont l'amélioration des performances, une moindre dépendance aux matériaux critiques et/ou toxiques (électrocatalyseurs à partir de métaux non nobles, d'atomes isolés, de défauts

contrôlés, de polymères plus respectueux de l'environnement...), une réduction des coûts et une augmentation de la durabilité (réduction de la température de fonctionnement dans les piles à combustible haute température, systèmes réversibles électrolyseur et pile).

La fonctionnalisation des surfaces permet, entre autres, une nano-structuration d'édifices complexes pour la catalyse, la photocatalyse, les réactions redox, la détection d'objets biologiques (capteurs) ainsi qu'un contrôle de la réactivité de surface avec, en particulier, la limitation des phénomènes de corrosion. Ces études sont conduites dans des milieux variés plus ou moins complexes comme les électrolytes liquides (organiques et aqueux), sels fondus, liquides ioniques, polymères, céramiques, gaz ou milieux physiologiques. Le contrôle de la réactivité des surfaces et interfaces est essentiel pour atteindre les performances recherchées. L'utilisation de surfaces modèles permet, parfois, de mieux appréhender ces questions. On retrouve des approches utilisées en catalyse hétérogène pour le contrôle de la réactivité des surfaces réelles, combinant caractérisation *in situ* ou *operando* en vue de la détermination des mécanismes de transport électronique et ionique, des mécanismes réactionnels (transfert de charge, adsorption), des interactions biologiques, et de la modélisation des mécanismes délétères (dégradation des matériaux et des interfaces, adsorption non-spécifique...).

Dans le domaine, plusieurs concepts et systèmes font l'objet de travaux en forte augmentation : l'utilisation des pérovskites hybrides pour la conversion photovoltaïque, les technologies post Li-ion pour les batteries (systèmes « tout solide », électrode négative en lithium métal, utilisation de cations divalents), le développement des systèmes à composés redox organiques pour les batteries à flux redox. La protection contre la corrosion des métaux et alliages *via* des solutions respectueuses de l'environnement est également un enjeu fort. Ainsi, le remplacement du Cr(VI) est l'un des défis auxquels est confrontée la communauté. En bio-ingénierie des interfaces, la maîtrise de l'adsorption non-spécifique en milieu complexe

reste un enjeu à maîtriser. L'introduction des nanotechnologies ouvre de nouveaux chantiers pour l'élaboration et la caractérisation d'interfaces sur des substrats multi-matériaux et multi-échelles structurés à deux ou trois dimensions.

III. Répartition géographique et structuration des équipes et des moyens

A. Photographie des chercheurs, unités et équipes de la section 14⁽³⁾

La section 14 évalue 85 unités mixtes de recherche (UMR), 7 unités propres de recherche (UPR), 5 unités mixtes de services (UMS), 3 unités mixtes internationales (UMI) et 17 fédérations de recherche (FR). Pour les 85 UMR, 44 sont rattachées à la section 14, et parmi celles-ci 18 ont la section 14 comme section principale. Pour les UPR, 4 sont rattachées à la section 14, et une UPR a pour section principale la section 14. Enfin pour les fédérations, 4 sur les 17 sont rattachées principalement à la section 14. Les sections 13, 12 et 15 sont les plus souvent rencontrées comme sections secondaires de rattachement (Figure 2). Ces tendances corroborent l'analyse faite en introduction sur la base des candidatures multiples aux concours.

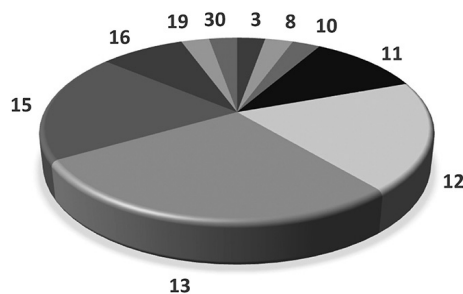


Figure 2 : Répartition des sections secondaires des UMR rattachées à la section 14 en section principale.

Outre leurs rôles de structuration des moyens (*cf.* partie III.C), les fédérations sont aussi un outil pour une thématique de recherche, pour lui conférer davantage de visibilité sur le plan national ou développer un réseau collaboratif public-privé dédié à certains domaines comme par exemple, l'écoconception et les ressources renouvelables. Pour les fédérations, le nombre de sections de rattachement varie de 2 à 9 avec une moyenne de 5. Douze d'entre elles sont rattachées principalement à l'Institut de Chimie, les cinq autres sont rattachées aux instituts INEE, INSIS ou INP.

La distribution des chercheuses et chercheurs de la section 14 au sein des unités est très disparate. 27 unités ont un seul membre de la section 14 et 24 en comptent entre 2 et 4. À l'opposé 22 unités comptent entre 5 et 11 membres de la section 14 et 4 unités en ont plus de 24. Les chercheurs et chercheuses de la section 14 (environ 300), sont répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain (Figure 3). Aucun n'est présent en territoire ultramarin, ni en Corse. L'effectif moyen (non permanents inclus) par unité comprenant des membres de la section 14 est de 155 personnes, le minimum étant de 17 et le maximum de 664 personnes ; pour les unités rattachées à la section 14, les personnels permanents représentent en moyenne 55 % de l'effectif global et se répartissent comme indiqué sur la Figure 4.

Concernant les FR, les effectifs propres varient de 1 personne (Institut Lavoisier-Franklin) à 22 personnes (Institut de chimie de Toulouse). Ces personnels sont directement rattachés aux fédérations et comprennent la direction, les gestionnaires et pour certaines, les personnels d'appui à la recherche en charge des équipements mutualisés des plateformes.

L'organisation des UMR est pyramidale ou matricielle avec un nombre de niveaux de structuration variant de 2 à 4 (6% 4 niveaux, 39% 3 niveaux, 55% 2 niveaux). Les premiers niveaux (groupes, axes, thèmes, équipes) sont généralement constitués de 3 à 10 C et EC. Globalement, 16% des unités sont dirigées par des femmes et 44% possèdent au moins une directrice ou directrice adjointe. Pour les 85 UMR de la section, ces pourcentages sont du même

ordre (18%, 41%), alors qu'ils sont supérieurs pour les 7 UPR (29%, 57%). La part de femmes à la direction des FR est seulement de 3 sur 17, et pour un tiers des FR seulement, des femmes participent à la direction comme adjointe.

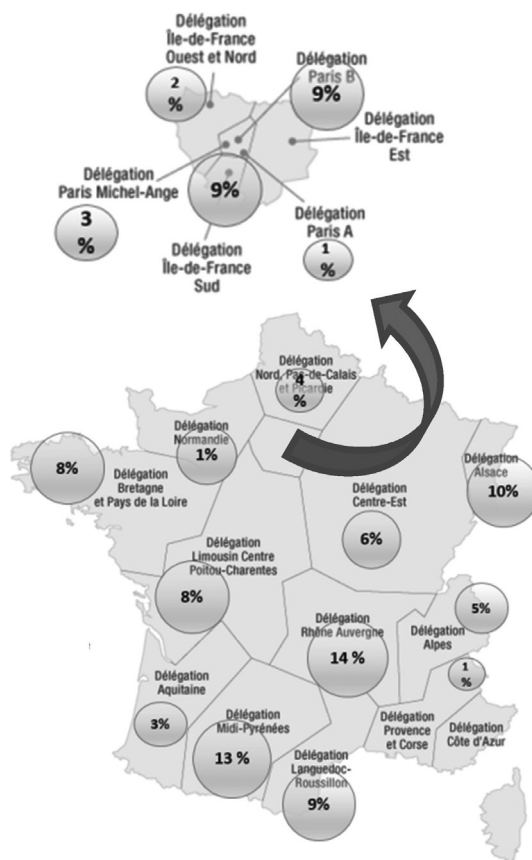


Figure 3 : Répartition géographique des chercheurs rattachés à la section 14.

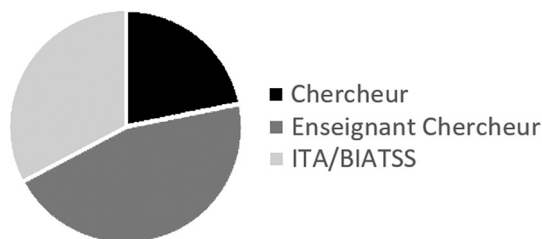


Figure 4 : Répartition des personnels permanents au sein des unités rattachées à la section 14.

B. Évolutions

La structuration de la communauté en unités de recherche a peu évolué au cours des cinq dernières années. Les grands regroupements d'unités opérés par l'institut de chimie les années précédentes ne sont plus observés. Les restructurations actuelles se jouent principalement à un autre niveau (Idex, I-sites, regroupements régionaux d'universités). Les opérations au niveau des unités semblent plus sélectives et destinées à créer de nouvelles structures permettant une coordination plus étroite entre différents acteurs de la recherche fondamentale et appliquée dans certains secteurs stratégiques. Pour la section 14, la mise en place des structures de recherche originales que sont la FR INCREASE (International Center on Eco-conception and Renewable Resources) et l'UMR IPVF (Institut Photovoltaïque d'Île-de-France) sont ainsi des exemples frappants et réussis opérés au cours des cinq dernières années dans deux domaines d'intérêt majeur que sont la valorisation de la biomasse et la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Depuis 2012, les recrutements de chercheurs ont été relativement bien répartis sur le territoire national. Les recrutements les plus nombreux concernent l'Île de France (14 chargés de recherche et un directeur de recherche), la région toulousaine (6 chargés de recherche), la région lyonnaise (4 chargés de recherche) et la Bretagne (5 chargés de recherche), pour un total de 46 recrutements (45 chargés de recherche et un directeur de recherche).

Au niveau thématique, on constate un certain déséquilibre dans les recrutements de chercheurs. En effet, si les candidates et candidats au concours DR se répartissent en trois ensembles *Chimie moléculaire* (chimie organométallique et de coordination, catalyse homogène), *Catalyse hétérogène* (matériaux, méthodes, procédés) et *Interfaces* (électrochimie, surfaces et interfaces) de taille à peu près équivalente, tel n'est pas le cas pour les lauréates et lauréats des concours entrant au CNRS. Depuis 2016, 24 CR et 1 DR ont été recrutés en section 14. Ces personnels nouvel-

lement recrutés se répartissent en 4 blocs de taille équivalente : chimie organométallique et de coordination, catalyse homogène, catalyse hétérogène et interfaces. En d'autres termes, la moitié des recrutements se fait actuellement dans des thématiques de chimie moléculaire (13 sur 25 exactement). Cette situation induira, si elle se prolonge, un changement dans l'équilibre des thématiques au sein de la section. Il ne s'agit pas d'une volonté de la section, ni de la direction qui, au travers des coloriages et fléchages, a plutôt tenté de compenser cette tendance.⁽⁴⁾ Il s'agit simplement d'un reflet des profils des candidates et candidats aux postes CR, issus majoritairement des thématiques de la chimie moléculaire. Une analyse rapide montre que cet état de fait ne provient pas d'un effort de formation par la recherche plus faible des équipes travaillant dans les thématiques de catalyse hétérogène ou d'interfaces, mais d'une moindre orientation des titulaires d'un doctorat formés dans ces thématiques vers la recherche académique, du fait des fortes opportunités d'emploi dans le secteur privé dans les champs thématiques les mieux couplés aux entreprises. Par conséquent, malgré un rééquilibrage apporté par une proportion plus élevée de candidates et de candidats (et de personnes recrutées) de nationalité étrangère, ces thématiques voient leur vivier de candidatures au recrutement réduit.

C. Structuration des moyens⁽⁵⁾

Les chercheurs et les chercheuses de la section 14 développent de plus en plus des approches communes consistant à multiplier les caractérisations physiques et chimiques des systèmes étudiés pour mieux aborder leur complexité. Dans ce contexte, les laboratoires doivent pouvoir donner accès à leurs équipes à des palettes étendues d'instruments mi-lourds afin de leur permettre d'obtenir rapidement et efficacement des informations sur les objets étudiés avant, éventuellement, de poursuivre les investigations de façon plus détaillée ou

dans des environnements plus exigeants sur les grands instruments. Dans ces conditions, l'organisation des plateformes instrumentales, et leur jouvence, devient de plus en plus cruciale pour la communauté.

Plusieurs UMR et UPR affichent des plateaux techniques ou plateformes particulièrement bien équipés avec un ensemble d'équipements mi-lourds ouverts à la communauté académique et industrielle aussi bien pour l'analyse de molécules organiques et biologiques que la caractérisation des matériaux. Plus de la moitié des unités ont structuré des plateformes en leur sein. Certaines compétences techniques et scientifiques s'affichent aussi par une concentration de petits équipements dédiés à une technique de caractérisation spécifique.

L'origine des fonds permettant l'acquisition d'équipements mi-lourds est diverse mais se répartit globalement en trois catégories. Certaines unités ont bénéficié de crédits CPER / FEDER importants pour équiper leurs plateformes. Des laboratoires lauréats d'appels à projet LABEX et / ou EQUIPEX ont bénéficié de subventions notables pour l'acquisition d'équipements mi-lourds. Enfin, quelques unités parviennent à financer les équipements des plateformes grâce à leurs activités contractuelles (contrats industriels). Les dépenses de maintenance et la jouvence des instruments de pointe restent une préoccupation pour la plupart des unités, et la mutualisation des moyens financiers et humains permet d'aider à la gestion des budgets de fonctionnements des gros équipements.

Les fédérations jouent un rôle structurant dans la mutualisation des équipements et le développement de plateformes analytiques ou technologiques de très haut niveau. Certaines affichent une plateforme mutualisée dédiée à la fédération : c'est le cas de 7 des 17 FR intéressant la section. La plupart des autres fédérations affichent des regroupements de laboratoires sans création de plateforme commune. Quant au mode de fonctionnement des FR affichant une plateforme commune, il diffère d'une entité à l'autre. Certaines choisissent de mettre à disposition une partie seulement des équipements mi-lourds figurant dans

les unités (Institut des Matériaux de Paris-Centre ou Chimie moléculaire de Paris-Centre : organique, inorganique et biologique, par exemple) ; d'autres affichent surtout un matériel de pointe et de haute technicité (Institut Michel-Eugène Chevreul).

Plusieurs plateformes offrent la possibilité de réservation en ligne, avec une tarification des prestations ou demande de devis sur mesure. Certains équipements de pointe sont ouverts à l'ensemble de la communauté scientifique notamment la spectrométrie de masse FT-ICR, l'analyse de surface et la Résonance Paramagnétique Électronique (Institut Michel-Eugène Chevreul). Les équipements RMN sont accessibles sur appel à projet à travers l'infrastructure de recherche des RMN à très hauts champs, répartie sur 7 sites français.

Compte tenu des nouvelles possibilités, la communauté est aussi très active dans les caractérisations utilisant des sources de rayonnement synchrotron notamment l'ESRF et SOLEIL et plus particulièrement dans les domaines de l'absorption X (par exemple l'EQUIPEX ROCK à SOLEIL) et des spectroscopies et imageries *operando*.

Enfin, avec les besoins croissants des moyens de calculs, les membres de la communauté s'organisent pour avoir à leur disposition des moyens de calcul locaux et/ou des ressources offertes par le Grand Équipement National de Calcul Intensif (GENCI) et des mésocentres régionaux de calcul.

IV. Contexte international

A. Compétition internationale

La part française de la recherche dans les champs scientifiques couverts par la section 14 peut être estimée en s'appuyant sur la contribution des laboratoires français dans la pro-

duction scientifique du domaine. Cette part doit être mise en perspective par rapport aux moyens budgétaires dont disposent les équipes, et des moyens humains et modes d'organisation correspondants.

Une étude récente portant sur le domaine général de la catalyse montre que ce domaine, au cœur des activités de la section 14, « se porte bien ». ⁽⁶⁾ Selon cette étude, le taux d'accroissement du nombre d'articles publiés est de l'ordre de 30 % en cinq ans, supérieur à celui de l'ensemble des disciplines scientifiques. La qualité de cette recherche est aussi en augmentation. Si la productivité française s'améliore comme dans beaucoup de pays, la qualité de sa recherche est dans la moyenne et reste donc inférieure à celle des États-Unis, de la Suisse et des grands pays européens.

En élargissant l'étude de la production scientifique à l'ensemble des mots clés de la section 14, on constate une croissance encore plus soutenue de la production scientifique mondiale dans de nombreux domaines du périmètre de la section. ⁽⁷⁾ Une telle mesure de la croissance est en partie artificielle ; elle traduit surtout l'affichage que les chercheurs donnent à leur activité. Ainsi, certains champs thématiques dont l'affichage n'est pas considéré suffisamment attractif ne sont pas mis en avant et ne connaissent qu'une progression apparente limitée, comme la chimie de coordination par exemple. L'invocation d'une utilité socio-économique dans l'affichage d'une activité scientifique est devenue semble-t-il incontournable : ainsi « catalyse homogène » et « catalyse hétérogène » affichent des progrès honorables voire soutenues, mais bien en retrait de l'affichage de l'activité « catalyseurs pour l'énergie » qui, bien que déjà conséquent sur la période 2010-2014, fait plus que doubler sur la période 2015-2019. De même, l'affichage de l'activité « stockage de l'énergie » (qui ne se limite pas au champ thématique de la section 14), déjà très important, connaît également une progression spectaculaire. Au crible – imparfait – de cette analyse, les autres activités correspondant à des mots clés de la section et qui connaissent une progression internationale très forte sont les procédés pour l'énergie,

l'électrocatalyse, la modélisation cinétique pour la catalyse et la valorisation de la biomasse (dans ces deux derniers cas, le périmètre de l'activité reste relativement modeste en dépit de sa progression). Si on tente des regroupements de mots-clés sur des thématiques plus larges, on constate, toujours en accord avec ce qui précède, une progression spectaculaire des activités s'inscrivant dans les champs énergie / environnement / santé, mais aussi de la nanochimie (non pas revendiquée en tant que telle, mais dans les déclinaisons de l'utilisation des nanoparticules en réponse à des défis sociétaux), de la biomasse (traitement et valorisation) et de la catalyse non conventionnelle (essentiellement la photocatalyse).

La même analyse a été menée de façon comparative avec un grand compétiteur européen, l'Allemagne, un pays traditionnellement considéré comme chef de file de la compétition scientifique internationale, les États-Unis, et un compétiteur émergent qui est en passe maintenant de prendre la tête de cette compétition, la Chine. Le fait le plus marquant de cette étude de la production scientifique nette est le maintien d'un niveau de croissance époustoufflant des contributions chinoises dans les champs thématiques de la section. Dans la plupart des travaux se rapportant aux mots clés analysés, la croissance de la contribution chinoise sur les années 2015-2019 comparée aux années 2010-2014 est supérieure à deux fois celle des autres compétiteurs considérés. La Chine se positionne maintenant en contributeur principal du domaine, avec une part de la production scientifique de l'ordre de 27 % (+8 % en cinq ans, ce qui est considérable), celle des États-Unis reculant à environ 21 % (en recul de plus de 3 %), l'Allemagne se maintenant à environ 8 % (recul de l'ordre de 0,5 %) et celle de la France représentant à présent environ 5 % (recul d'un peu plus de 1 %). Les domaines dans lesquels la croissance chinoise est la plus spectaculaire (de l'ordre du quadruplement de la production ou plus !) sont le stockage de l'énergie, les procédés pour l'énergie, la valorisation de la biomasse et la modélisation cinétique. Sur des thématiques élargies, la croissance de la production chinoise est particulièrement notable dans les domaines de la

chimie théorique et modélisation, de la nanochimie, de la biomasse et dans les champs énergie / environnement / santé. La Chine se positionne maintenant nettement en tête de la compétition mondiale dans les domaines de la conversion et du stockage de l'énergie, de la corrosion et des traitements de surface. En revanche, elle n'a pas encore complètement rattrapé son retard dans le domaine de la chimie théorique et modélisation, pour lequel les États-Unis demeurent clairement en tête.

En ce qui concerne la France, la progression constatée de la production scientifique demeure inférieure à la progression mondiale. Même dans un domaine comme celui de la valorisation de la biomasse où les équipes françaises avaient su se positionner très tôt, et malgré une croissance très soutenue de la production nationale dans le domaine en 2015-2019 par rapport à 2010-2014, la part française dans la production internationale recule nettement du fait de l'explosion des contributions des autres pays. De façon générale, le recul de la part française est en partie lié à la croissance inflationniste des contributions chinoises. Mais, dans pratiquement tous les domaines du champ thématique de la section, la progression de l'Allemagne est plus importante que celle de la France : même avec un compétiteur européen, le différentiel tend donc à s'amplifier.

Ce constat d'une bonne santé somme toute relative de la recherche française dans le champ thématique couvert par la section 14 (une progression certes notable, mais qui semble décrocher par rapport aux compétiteurs qui font la course en tête) mériterait d'être analysé plus en détail en tentant d'apprécier l'importance qualitative des différentes contributions. L'augmentation sensible de la production et la dilution des acteurs de la recherche rend plus difficile l'identification des nouveaux acteurs, en particulier à l'international. Au vu des moyens consacrés par les différents acteurs internationaux à la recherche scientifique, cet état de fait devrait se poursuivre et on doit s'attendre à une érosion de la part française à la recherche scientifique.⁽⁸⁾ Une analyse d'indices de reconnaissance (à définir) fournirait certainement une autre image que la

simple quantification de la production scientifique mais présenterait également des biais, quoique différents. Jean-Pierre Sauvage s'est certes vu distinguer par le prix Nobel en 2016 pour ses travaux en chimie de coordination, mais il serait vain de s'en tenir à ce seul constat. Plutôt que de tenter cet exercice, périlleux et nécessairement en partie subjectif, la section veut souligner que quelle que soit l'approche adoptée, l'évolution de la forme de la compétition scientifique mondiale dans son domaine entraîne nécessairement une dilution accrue de la contribution française. Dans les domaines hautement concurrentiels, les effets de taille sont tels que ce constat vaut même lorsque l'effort national est structuré autour d'acteurs de qualité, comme pour le stockage électrochimique de l'énergie. Il convient donc de s'interroger sur les modes d'organisation de la recherche permettant de conserver une contribution nationale identifiable et pertinente dans le concert international.

B. Effort de recherche

De ce point de vue, les évolutions mises en place depuis une quinzaine d'années montrent de claires insuffisances. Comme le montre l'analyse de la production scientifique, l'effort de recherche affiché par les acteurs internationaux tend à focaliser les travaux sur les mêmes thèmes, pilotés par des enjeux de société globaux. La France n'échappe pas à ces tendances, clairement induites par la généralisation du financement de la recherche sur projets. Celle-ci contribue à assécher la créativité, qui ne peut pas s'épanouir en dehors des sentiers balisés, et pénalise la recherche à long terme et les innovations de rupture qui, par principe, se planifient mal. Une plus grande diversité des modes de financement est donc indispensable. Jean-Pierre Sauvage aurait certainement eu plus de difficultés à mener les travaux qui lui ont permis d'être distingué s'il avait dû justifier à l'aune d'enjeux sociétaux les considérations topologiques qui l'ont guidé au début de son travail.

Certaines spécificités de la catalyse française dans le concert international soulignées par un rapport récent⁽⁶⁾ peuvent certainement se généraliser à l'ensemble des champs thématiques de la section 14. Ainsi, le nombre de chercheurs en France n'est pas sensiblement plus bas que dans les autres pays étudiés.⁽⁹⁾ Sur ces pays, la France est l'un de ceux où le nombre de doctorants et post-doctorants est le plus faible.⁽¹⁰⁾ En revanche, le statut permanent des chercheurs et du personnel technique offre aux équipes françaises de vrais atouts : il permet de transmettre les savoirs et savoir-faire, de constituer des cultures d'institut et de construire sur la durée des pôles d'excellence. Par conséquent, le pragmatisme suggère là encore de diversifier les approches et de s'affranchir des préjugés idéologiques. Il faut créer les conditions adéquates à une augmentation du nombre de doctorants au sein des laboratoires pour le rapprocher des standards internationaux ; il faut aussi donner aux personnels permanents (chercheurs, enseignants-chercheurs et personnels techniques) les moyens minimaux leur permettant de conduire une recherche originale. On augmentera ainsi les forces vives dans les laboratoires et on utilisera plus efficacement les chercheurs permanents recrutés après une compétition sévère (un tiers des chercheurs recrutés en section 14 sur la période 2016-2019 sont étrangers).

Le rapport cité⁽⁶⁾ relève que le classement de la production française en matière de qualité (évaluée sur la base du facteur d'impact des journaux) est bien meilleur que celui obtenu en matière de nombre d'articles produits par le personnel permanent. Là encore, cette conclusion se généralise plausiblement à l'ensemble des domaines de la section. Mais l'équilibre que doivent maintenir les chercheurs et les chercheuses de la section est fragile, et l'explosion de la production internationale dans le domaine ne peut que rendre cet équilibre précaire. L'adaptation des modes d'organisation de la recherche, en permettant notamment d'initier des approches innovantes sans dépendre d'une réussite aléatoire à des appels à propositions nécessairement normalisés, devrait permettre de mieux capitaliser sur les atouts des équipes françaises. Il est ainsi envisageable de maintenir

voire renforcer la position des équipes françaises dans des conditions où, ni la pression démographique, ni l'ampleur des efforts nationaux, ne leur donnent un avantage.

V. Les disciplines en difficulté

Certaines thématiques, présentes dans le rapport de conjoncture précédent, s'avèrent absentes ou moins présentes dans les rapports et projets actuels (ceux des dossiers de candidature CR et DR et les récents rapports HCERES d'auto-évaluation d'unités). Certaines paraissent pourtant stratégiques ou d'intérêt scientifique majeur. Les décrochages thématiques peuvent être la conséquence d'effets de modes au sein des communautés, mais sont aussi une conséquence directe des politiques scientifiques privilégiant les grands défis sociétaux, et délaissant ainsi les sujets qui « n'entrent pas ou plus dans le cadre ». Ainsi par exemple, en catalyse hétérogène, les projets mettent de plus en plus l'accent sur la valorisation de la biomasse. Une des conséquences de cet engouement est le délaissement des études sur les sources fossiles (pétrole et charbon) qui restent cependant incontournables aujourd'hui et dans les années à venir. En effet, l'augmentation de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que l'utilisation optimale et mesurée de ces ressources demeurent stratégiques. Par ailleurs, dans le domaine de l'électrochimie, si les piles à combustibles semblent toujours faire l'objet de nombreuses études, l'accent est plutôt mis sur des dispositifs à basse température plutôt que celles fonctionnant à haute température (SOFC, MCFC). Enfin, depuis 10 ans, l'irruption dans le domaine du photovoltaïque des matériaux pérovskites hybrides à base d'halogénure de plomb a simultanément motivé un important développement du domaine des matériaux pour l'énergie solaire, avec des travaux à fort impact, et conduit à une réduction importante des travaux sur d'autres filières matériaux dont le développement

n'avait pas atteint le niveau de maturité suffisant pour des applications, comme par exemple la filière CZTS ou les cellules à colorants.

Certaines thématiques sont peu abordées en raison de la complexité du défi. Ainsi par exemple, si l'activation des petites molécules reste une priorité tant en catalyse homogène qu'hétérogène (surtout celle du CO₂ et dans une moindre mesure de l'hydrogène et du dioxygène), on constate (malgré quelques résultats remarquables) un nombre restreint de projets sur l'activation du diazote, un défi ancien et ardu mais d'actualité renforcée par les applications envisageables pour le stockage des énergies renouvelables. Un autre objet d'étude qui n'est plus beaucoup abordé en section 14 est celui de la cinétique aux interfaces solide/liquide ou solide/gaz. La compréhension générale de la cinétique et la description théorique correspondante sont très peu explorées dans le domaine. La difficulté se situe au niveau du décalage entre le monde microscopique (processus élémentaires de diffusion, de formation / rupture de liaisons, transfert de charge) et le monde méso- et macroscopique (constante de diffusion, taux de réaction et polarisation). Le développement de modèles hiérarchiques permettant de décrire efficacement des événements à des échelles différentes, et plus encore, de permettre le transfert des informations entre ces échelles, est cependant crucial.

Enfin, d'autres thématiques, en concurrence avec les approches industrielles, sont insuffisamment abordées sur le plan académique compte tenu de leur importance stratégique. C'est par exemple le cas des procédés sur le traitement et la remédiation des milieux : le captage et la concentration des métaux lourds et surtout des radionucléides par des ligands adéquats mériteraient d'être plus abordés avec les approches spécifiques de la section. Malgré l'importance stratégique de cette thématique (démantèlement des centrales, anciens sites industriels pollués, accident nucléaire potentiel, etc.) et des financements industriels disponibles, on relève très peu de projets récents. De même, pour les métaux en biologie ou en chimie bioinorganique, si le développement de sondes multimodales, en particulier les

sondes thérapeutiques, de biopiles et de systèmes biomimétiques et la compréhension du rôle des métaux dans des processus biologiques continuent à faire l'objet de nombreuses études et projets, il n'en va pas de même des complexes métalliques à visée purement thérapeutique comme les anti-cancéreux.

VI. Recommandations

A. Priorités thématiques

La section 14 porte des thématiques d'intérêt primordial qui, au vu des enjeux sociétaux actuels permettent aux équipes qui y sont impliquées d'obtenir des moyens pour développer leurs activités plus facilement que les autres. Elles font néanmoins face à une concurrence intense et très fournie. Dans ces thématiques, il importe donc d'orienter les appels à propositions pour éviter aux projets de se concentrer sur des objectifs à court-terme (souvent peu réalistes ou partagés avec de très nombreux concurrents) et *favoriser des approches originales et à plus long terme, laissant une place notable aux approches fondamentales et de compréhension des mécanismes réactionnels mis en jeu.*

La section 14 porte par ailleurs d'autres thématiques stratégiques permettant de maintenir des expertises disciplinaires essentielles. La tutelle doit veiller à *maintenir ce socle* en permettant aux équipes qui y contribuent de disposer des moyens (financiers et humains) pour rester au meilleur niveau international. Des dispositifs non compétitifs doivent être élaborés ou réinventés, car certaines thématiques peuvent difficilement s'inscrire dans les dispositifs ciblant des enjeux de société, et souffrent par ailleurs de la compétition avec d'autres domaines fondamentaux plus à la mode dans les appels non thématiques. Il s'agit là encore de choix stratégiques à long terme.

Enfin, les équipes de la section travaillant dans des domaines bien couplés aux entreprises attirent plus difficilement des candidats en vue d'un recrutement. La tutelle doit *encourager de telles candidatures*. La section recommande que les coloriations soient réservés à ces situations, la dynamique associée aux thématiques émergentes permettant le plus souvent de susciter des candidatures de qualité.

B. Structuration et soutien

Comme l'ensemble de la recherche française, l'atout principal des équipes de la section réside dans ses personnels permanents, chercheurs, chercheuses et ITA. Le recrutement de ces permanents à un stade précoce de leur carrière est un atout au plan international. Il est important de le maintenir et de *tirer profit de la pérennité de ces emplois* pour inciter les équipes à entreprendre des projets à long terme, plus originaux, plus risqués et à plus fort impact.

Il est aussi essentiel de permettre aux équipes d'accéder à des équipements de très bon niveau. Le maintien des personnels techniques en support est aussi essentiel : ce sont aussi des « forces vives » des laboratoires. Ils permettent la réalisation d'expérimentations originales, de hauts niveaux tant techniques que scientifiques et sont essentiels au rayonnement de nos laboratoires. La création de fédérations de recherche, ou de tout autre organe structurant peut être une voie efficace pour y parvenir. Il convient toutefois de veiller à ce que les *personnels dédiés aux fédérations restent en lien avec les UMR et UPR*.

C. Face à la compétition internationale

Comme déjà mentionné, il est essentiel de tirer profit des spécificités nationales pour favoriser la recherche à long terme. De ce

point de vue, les chercheurs et chercheuses de la section 14 souffrent de la complexité nouvelle qui bouleverse le fonctionnement et l'organisation de la recherche, comme le souligne le rapport de prospective établi en 2019 par le Conseil Scientifique de l'Institut National de Chimie.⁽¹¹⁾ Sur ce plan, il est aussi nécessaire de *mettre en valeur les modes d'organisation collaboratifs* et de permettre à plusieurs modèles d'émerger. La figure du « Principal Investigator » ne doit pas être la seule voie valorisée, tant dans la gestion des carrières que dans l'obtention des financements. Sur un autre plan, il est important aussi de *valoriser, conserver et développer les liens avec l'industrie et les « start-up »*.

Conclusion

La chimie de coordination, la maîtrise de l'activité catalytique et l'étude de la réactivité des interfaces, des métaux, en particulier les métaux de transition et de leurs oxydes, qui constituent le cœur de compétence des équipes de la section 14, sont des outils cruciaux pour relever un grand nombre de défis actuels. Il s'agit par exemple de l'utilisation d'éléments abondants et peu exploités dans les transformations catalytiques ou la conversion et le stockage de l'énergie, de l'utilisation de nouvelles sources pour la production de grands intermédiaires en chimie, de la mise au point de détecteurs et de dispositifs de dépollution ou de nouvelles sondes pour améliorer les techniques de diagnostic et de thérapie en médecine. Il paraît donc essentiel de poursuivre le développement de connaissances et de savoir-faire dans les disciplines concernées afin de mieux appréhender les défis à surmonter. Ces enjeux motivent aussi une compétition internationale qui s'est considérablement accrue au cours de la période écoulée. De ce point de vue, la chance que représente pour la section 14 le fait de voir ses thématiques au centre de questions d'intérêt crucial constitue aussi une forme de menace associée à l'apparition massive de

concurrents disposant de moyens très substantiels. Ceci doit impérativement conduire les équipes de la section 14 et leurs tutelles à réfléchir à comment mener leurs actions et avoir un impact en dépit d'un nombre d'acteurs restreint et de moyens financiers limités, lorsqu'on les rapporte à l'échelle internationale. Dans cette optique, la section a émis dans ce rapport quelques recommandations visant à privilégier réellement l'action sur le long terme, plutôt que des

projets sur des objectifs à court terme le plus souvent peu réalistes (délais de réalisation trop courts, simplification du système). Ceci nécessite en particulier de repenser les modes de soutien et de financement pour se démarquer de pratiques compétitives mais peu efficaces sur le long terme, et de miser sur le potentiel humain des équipes qui peut encore, si on l'exploite intelligemment et le laisse s'épanouir, faire la différence.

ANNEXE 1

SIGLES

ALD : Atomic-Layer Deposition	FEDER : Fonds Européen de Développement Régional
C : Chercheuse ou Chercheur	FR : Fédération de Recherche
COV : Composés Organiques Volatils	FT-ICR : Fourier-Transform Ion Cyclotron Resonance
CPER : Contrat de Plan Etat-Région	HCERES : Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur
CR : Chargée de Recherche ou Chargé de Recherche	I-SITE : Initiative Science-Innovation-Territoires-Économie (projet lauréat du programme investissements d'avenir)
CRAC : Compte Rendu annuel d'ACTivité des chercheurs	IDEX : Initiative D'EXcellence (projet lauréat du programme investissements d'avenir)
CVD : Chemical Vapor Deposition	INC : INstitut de Chimie
CZTS : Copper Zinc Tin Sulfide	INEE : INstitut Écologie et Environnement
DFT : Density Functional Theory	INP : INstitut de Physique
DR : Directrice de Recherche ou Directeur de Recherche	INSIS : INstitut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
EC : Enseignante-Chercheuse ou Enseignant-Chercheur	ITA : Ingénieurs et Ingénieures, Techniciens et Techniciennes et Administratifs et Administratives
EQUIPEX : EQUIPement d'EXcellence (projet lauréat du programme investissements d'avenir)	LABEX : LABoratoire d'EXcellence (projet lauréat du programme investissements d'avenir)
ESRF : European Synchrotron Radiation Facility	
ETEM : Environnemental Transmission Électron Microscope	

MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell

NAP-XPS : Near Ambient Pressure X-ray Photoelectron Spectroscopy

NHC : N-Heterocyclic Carbene

RMN : Résonance Magnétique Nucléaire

ROCK : Rocking Optics for Chemical Kinetics

SOFC : Solid-Oxide Fuel Cell

UMI : Unité Mixte Internationale

UMR : Unité Mixte de Recherche

UMS : Unité Mixte de Services

UPR : Unité Propre de Recherche

Notes

(1) En 2019, environ 8% des candidats et candidates postulaient également en section 11, 14% en section 12, 11% en section 13, 12% en section 15, 6% en section 16 et 5% en CID 54.

(2) Analyse statistique avec IRaMuTeQ (<http://www.iramuteq.org/>) du corpus constitué des sections « Point(s) fort(s) de vos recherches » renseignées par les chercheuses et chercheurs rattachés à la section 14 dans leurs CRAC (2013-2018).

(3) Données issues de l'annuaire du CNRS.

(4) En 2017, un fléchage a permis le recrutement d'un DR dans la thématique Interfaces, en 2018 et 2019, des coloriations ont permis le recrutement d'un CR dans la thématique Interfaces et de deux CR dans la thématique Catalyse hétérogène.

(5) Selon l'analyse des rapports produits par les unités pour leur dernier examen par l'HCERES.

(6) Michel Lacroix, *La recherche et la catalyse dans les principaux pays du monde*, 2019 (<https://hal-udl.archives-ouvertes.fr/hal-02431297>).

(7) Nombre de productions scientifiques référencées par Clarivate Analytics dans Web of Science en réponse aux mots clés considérés.

(8) Selon la Banque Mondiale, en 2016, les États-Unis consacraient environ 420 milliards de dollar aux dépenses R&D, la Chine environ 230, l'Allemagne près de 100 et la France environ 55. En proportion du PIB, depuis 2010, l'effort national en R&D stagne en France et aux États-Unis, il progresse régulièrement en Chine et en Allemagne.

(9) Selon le rapport sur l'état de l'emploi scientifique en France (Ministère de l'Éducation Nationale de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 2016), le nombre de chercheurs et chercheuses en France (à 61% issus des entreprises) est inférieur à celui observé en Allemagne, aux États-Unis et en Chine. En proportion de la population active, le nombre de C et EC dans les administrations est le même en France et en Allemagne, nettement moindre aux États-Unis et en Chine.

(10) Dans les laboratoires de catalyse, le nombre de doctorantes et doctorants par chercheuse ou chercheur permanent est de l'ordre de 0,8 environ ; il est 10 fois plus grand aux États-Unis, 5 fois plus fort en Allemagne et 4 fois plus grand en Chine.

(11) <http://rapports-du-comite-national.cnrs.fr/publications>

SECTION 15

CHIMIE DES MATÉRIAUX, NANOMATÉRIAUX ET PROCÉDÉS

Composition de la section

Antoine MAIGNAN (président de section), Doïna-Margareta GORDIN (secrétaire scientifique), Jean-Luc ADAM, Silvère AKAMATSU, Florence BABONNEAU, Catherine BESSADA, Thierry CHARTIER, Marie-Vanessa COULET, Bernard DUSSOUBS, Philippe FALQUE, Corinne GERARDIN, Marie GUIGNARD, Abel HAIDOUX, Olivier JOUBERT, Houria KABBOUR, Mario MAGLIONE, Carlo MASSOBRIO, Philippe MIELE, Dominique POQUILLON, Olivier TOULEMONDE, Claudia ZLOTEA.

Résumé

Pluridisciplinarité, adaptabilité et engagement sociétal constituent sans aucun doute les points forts les plus remarquables de l'ensemble des thématiques de la section 15 qui vont de la synthèse à l'objet en passant par le procédé, la caractérisation avancée et la modélisation des matériaux. Dans le présent rapport de conjoncture, nous analysons ces différents thèmes et leurs évolutions récentes. En particulier, nous insistons sur le besoin d'une recherche exploratoire de nouveaux matériaux de pointe, étape indispensable vers l'innovation, comme par exemple la découverte de matériaux pour l'énergie, point fort de la section, avec les matériaux pour le stockage électrochimique, pour la filière hydrogène ou pour la réduction du bilan CO₂. La multifon-

ctionnalité souhaitée pour tous ces nouveaux matériaux repose sur des compétences uniques en chimie du solide, chimie des matériaux hybrides, métallurgie et thermodynamique. Cette science des matériaux inorganiques s'appuie sur ses interfaces avec la physique du solide et l'ingénierie, et également de plus en plus fréquemment avec la chimie moléculaire, les polymères, la matière molle et la biochimie. En termes d'évolution, la synthèse de matériaux en films minces par chimie combinatoire (« pulsed laser deposition » et « atomic layer deposition ») prend un essor important de même que les procédés de fabrication additive – métalliques ou céramiques – ce qui fédère des communautés toujours plus larges.

De même, les performances des techniques de caractérisation des matériaux

in situ voire *operando* offrent toujours plus de possibilités pour comprendre la formation des matériaux et leurs propriétés structurales et fonctionnelles en conditions opérationnelles. Toutes ces recherches s'appuient ou sont guidées par la modélisation et le « machine learning » est appelé à prendre de plus en plus de poids au sein de notre communauté.

Ces recherches exploratoires menées par les 315 chercheurs et chercheuses de la section (effectif 2019), principalement dans les laboratoires de l'INC mais aussi de l'INP (49 chercheurs) et de l'INSIS (12 chercheurs) s'inscrivent dans les enjeux sociétaux définis dans le programme Horizon Europe comme « climat, énergie et mobilité ». Les grandes infrastructures de recherches et réseaux européens sont essentiels quant à leur réalisation – synchrotrons, sources de neutrons, RMN, MET, centres de calculs... La fermeture du réacteur Orphée (diffusion et diffraction de neutrons) constitue donc une menace pour notre communauté.

Pour l'avenir, cette recherche doit être redynamisée pour être rendue plus attrayante aux yeux des futurs chercheurs grâce à des soutiens plus forts en termes de formation, via les moyens alloués aux laboratoires et aussi par des taux de succès plus importants aux appels à projets. De ce point de vue, la baisse de l'emploi scientifique constitue un risque majeur de disparition des aspects exploratoires au profit d'une recherche plus appliquée, pilotée uniquement par les ressources financières. Dans un contexte de compétitivité mondiale exacerbée, comme par exemple dans les matériaux quantiques nécessaires à la montée en puissance des calculateurs quantiques ou encore dans l'intelligence artificielle et le « deep learning » pour prédire et/ou identifier des matériaux toujours plus performants, les orientations en termes de recherche en « science des matériaux » devront faire l'objet de concertations plus larges que celles menées dans la section et au sein de l'INC.

Introduction

Les activités de la section 15 « Chimie des Matériaux, Nanomatériaux et Procédés » trouvent leur fondement dans la chimie du solide et de la matière condensée, la thermodynamique, pour synthétiser des matériaux inorganiques. Ce socle commun permet l'étude expérimentale, théorique et numérique de matériaux d'une grande diversité tant par leur nature (alliages métalliques, oxydes, non-oxydes, architectures hybrides, biomatériaux), que par leur structure (ordonnée ou désordonnée), par leurs propriétés (optiques, électroniques, ioniques, magnétiques, mécaniques, thermiques) et par leur forme (massif, film mince, nanostructuré, divisé). La section 15 est de ce fait très réactive à l'émergence de thématiques basées sur de nouveaux matériaux et en lien avec des enjeux sociétaux forts tels que l'énergie durable, la santé, l'environnement ainsi que les technologies de l'information et de la communication.

Les compétences des membres de la section 15, qui s'étendent de la synthèse à l'objet en passant par le procédé, la caractérisation et la modélisation, sont synonymes d'innovation. La première source d'innovation réside dans la **recherche exploratoire** de matériaux dont la conception passe par des méthodes de synthèse et d'élaboration originales, la mise à profit de données existantes, et la modélisation à toutes les échelles qui sert de guide à cette recherche. La seconde source d'innovation se trouve dans les méthodes de **caractérisation structurale** ainsi que dans la compréhension des **propriétés physiques**. Ces travaux s'appuient sur des techniques de pointe en imagerie, en diffraction et en spectroscopies. Les chercheurs de la section sont ainsi fortement impliqués dans le développement instrumental tant au niveau du laboratoire qu'au travers de réseaux nationaux ou de très grandes infrastructures de recherche. Enfin, **l'optimisation des matériaux et des procédés**, en vue d'applications industrielles, est une précieuse source d'inspiration et de motivation.

La recherche menée au sein de la section 15 est donc éminemment pluridisciplinaire et transversale ce qui la place en position d'excellence pour l'émergence de nouvelles thématiques (matériaux quantiques, alliages à haute entropie, composites thermo-structuraux bio-sourcés, matériaux bio-inspirés...) et de nouveaux procédés (techniques à base de poudres, procédés numériques, dépôts de films minces).

Nous avons choisi dans le présent rapport de tout d'abord présenter la partition thématique des activités de la section suivie, dans le chapitre 2, d'une description des évolutions thématiques récentes. La répartition géographique et l'évolution récente des effectifs sont discutées dans le chapitre 3 avec un focus particulier sur la place des femmes. Une recherche exploratoire forte, inscrite dans les gènes de la section 15, est la condition préalable à toutes les grandes découvertes récentes liées aux matériaux ; l'importance de cette recherche, qui assure l'innovation par le transfert technologique est exposée dans le chapitre 4. Le chapitre 5 démontre que cette recherche exploratoire est par essence même pluridisciplinaire dès lors que des fonctionnalités spécifiques sont visées (propriétés physiques remarquables ou applications en biologie par exemple). Le contexte international et compétitif dans lequel se placent les activités de la section est décrit dans le chapitre 6. Le manque d'attractivité de certains sujets de recherche, pouvant amener jusqu'à des difficultés à recruter des jeunes chercheurs talentueux, met certaines sous-disciplines en danger ; nous en discuterons dans le chapitre 7. À partir de cette analyse du paysage de la section 15, un certain nombre de recommandations sont formulées dans le chapitre 8 et suivies de conclusions générales.

I. Partition thématique en 2019

Comme évoqué dans l'introduction, la spécificité principale des activités des laboratoires

de la section 15 est de contrôler toutes les étapes de synthèse, de mise en forme et de caractérisations (structurales et fonctionnelles) de toute une variété de matériaux inorganiques. Il en résulte que les laboratoires de la section sont à même de :

- mener une approche intégrée « synthèse-structure-propriétés »,
- concevoir, synthétiser et caractériser de nouveaux composés,
- optimiser des matériaux pour maîtriser de nouvelles propriétés à des fins d'études fondamentales,
- élaborer des architectures spécifiques, des nano- micro-structures, des films minces en mettant en œuvre des procédés,
- intégrer des matériaux inorganiques dans des systèmes complexes (technologies de l'information, environnement, santé).

La dernière décennie a été marquée par une tendance forte à la mise en œuvre de matériaux nanométriques afin d'atteindre des fonctionnalités que des composés volumiques classiques ne possèdent pas. Par exemple, dans le **domaine de l'énergie**, le stockage électrochimique (batteries lithium, super-condensateurs) et la conversion (piles à combustible, électrolyseurs) atteignent le niveau de la production grâce à la mise en œuvre contrôlée de matériaux à grande surface spécifique ou nano-structurés. En **métallurgie**, la cristallisation locale de verres métalliques ou l'utilisation de composites carbone/métal permet de combiner des propriétés réputées incompatibles : rigidité et facilité de mise en forme, forte conductivité électrique et faible conduction thermique, conductivité électronique et propriétés magnétiques préservées dans les métaux nanométriques. En **optique**, la cristallisation de verres d'oxydes ou la synthèse de vitrocéramiques rend possible la production de composants optiques de grande taille possédant des propriétés inégalées : indices optiques linéaires et non-linéaires modulables ; absorption, émission et scintillation homogènes sur de grands volumes ; préformes structurées pour la réalisation de fibres complexes. La

coexistence et le couplage de propriétés (magnétique / électrique, élastique / magnétique, thermique / électrique) dans les **matériaux multi-fonctionnels** ont été grandement facilités par la création de composites bi- ou tridimensionnels comme, par exemple, les **multiferroïques**. Dans certains cas, des propriétés impossibles à obtenir en phase solide massive peuvent être créées dans des matériaux micro- ou nanostructurés : indice optique négatif dans les **métamatériaux**, **supraconductivité bidimensionnelle aux interfaces**, etc. La contribution principale des laboratoires de la section 15 dans ce processus de **structuration des matériaux multi-échelles** est d'intégrer des composés complexes, en partant de preuves de concept basées sur les matériaux simples : oxydes, nitrures, fluorures, carbures, binaires ou ternaires, solutions solides doubles ou triples, alliages, hybrides organiques-inorganiques, etc.

Parallèlement à cette évolution multidisciplinaire dans laquelle la chimie des matériaux est impliquée, il est nécessaire de réaffirmer la place prépondérante de la **chimie exploratoire**. En s'appuyant sur les concepts de base de la liaison chimique, des polyèdres de coordination et de la cristallographie, il est vital de **renforcer la synthèse de composés nouveaux** qui fait la force et l'originalité de notre discipline. Plusieurs initiatives ont été lancées récemment par les laboratoires et l'INC pour réaffirmer cette nécessité : action nationale pour une chimie du solide exploratoire, structuration nationale de la métallurgie, etc. Les différentes thématiques s'intégrant dans cette dynamique sont :

- **la métallurgie et la thermodynamique** avec entre autres : le contrôle local de la structure et de la stœchiométrie au sein d'alliages complexes et des défauts bidimensionnels (joints de grains et hétérointerfaces), la métallurgie prédictive pour le développement de nouveaux alliages et combinant calculs *ab initio* et thermodynamiques ; les alliages à haute entropie ; la thermodynamique des nano-objets et des films minces ; les surfaces et interfaces de verres ; les cristaux à grande maille et les quasi-cristaux métalliques ; l'application

des concepts, procédés et modélisation de la métallurgie aux solides non-métalliques ; l'extension des technologies additives aux solides non-métalliques ; le développement de nouveaux alliages et de procédés de substitution à des matériaux ou procédés classiques ne respectant plus les normes environnementales.

- **la chimie du solide** pour laquelle nous pouvons citer le renforcement des voies de synthèse classiques de la chimie inorganique (cristallogénèse, voie solide, chimie douce), l'extension de l'applicabilité des voies de synthèse en solution à des compositions non-oxydes, et si possible de taille nanométrique, l'utilisation de méthodes d'élaboration avancées (couches minces, frittage basses températures, utilisation des paramètres pression/champ électromagnétique, synthèse en milieu fluide supercritique, milli- et micro-fluidique), la coexistence et le couplage de propriétés dans les matériaux multifonctionnels intrinsèques (multiferroïques, magnéto-caloriques), la synthèse raisonnée de nouveaux composés s'appuyant sur les modélisations *ab initio* et allant au-delà d'une stratégie de substitution au sein de familles structurales données, la cristallographie quantitative en lien avec les calculs de type DFT. Il est à noter que l'intégration poussée des technologies d'intelligence artificielle couplée à la chimie combinatoire en chimie du solide reste un défi qu'il faudra relever à très court terme.

- **les nanomatériaux et hybrides** avec l'élaboration de matériaux de plus en plus complexes en termes de composition, de structuration multi-échelle, de fonctionnalités passives et actives, très souvent inspirés par le vivant ; le développement de matériaux bio-inspirés en particulier dans le domaine des biomatériaux et de l'ingénierie tissulaire.

En se basant sur cette démarche exploratoire, les laboratoires de la section 15 sont parfaitement placés pour s'impliquer à toutes les étapes du **cycle de vie des matériaux** et pour répondre à différents enjeux sociétaux :

- au niveau de la **synthèse** par le choix des précurseurs et des procédés permettant de

diminuer l'impact environnemental et de prendre en compte la disponibilité des ressources,

- au niveau de l'élaboration en développant des procédés à faible impact énergétique et bilan carbone,

- au niveau du **développement** par l'intégration de matériaux performants dans les systèmes pour accroître leur durée de vie tout en diminuant leur consommation énergétique,

- au niveau du **recyclage** grâce à la mise en œuvre de matériaux pertinents aux étapes de synthèse et de développement et permettant d'anticiper et de faciliter la séparation des éléments chimiques et leur re-conditionnement.

Nos laboratoires sont donc au cœur des **évolutions actuelles autour de la chimie verte et durable**.

La chimie des matériaux développée en section 15 s'appuie sur des compétences propres, mais aussi sur des interactions fortes avec les autres domaines de la chimie ainsi qu'avec les disciplines complémentaires que sont la physique, les sciences de l'ingénieur, la biologie et la médecine. Il en résulte une fertilisation croisée qui a fortement diversifié les domaines d'interventions des laboratoires de la section 15 et généré des avancées majeures au cours des dernières années dont certaines sont décrites brièvement ci-après.

L'interaction naturelle avec les **autres sous-disciplines de la chimie** a fait évoluer la synthèse des matériaux : la fonctionnalisation de surface et l'auto-organisation de matériaux inorganiques divisés nécessitent des compétences en chimie moléculaire et en matière molle. Les très récents travaux sur le stockage électrochimique de l'énergie montrent l'importance des interactions entre chimistes du solide inorganique et polyméristes. Un autre exemple est l'utilisation par quasiment tous les laboratoires de chimie des matériaux de calculs de structure électronique de type DFT comme outils de simulation, de prédiction de nouvelles phases, voire de modélisation de propriétés fonctionnelles.

Les échanges constants avec la **physique** ont quant à eux considérablement amélioré la compréhension des matériaux solides. Ainsi la synthèse de matériaux la plus parfaitement contrôlée permet de réaliser des études de pointe et des modélisations physiques s'appuyant sur des bases solides et reproductibles. L'utilisation optimale des grandes infrastructures de recherche dépend largement de cette synergie. Cela s'illustre par exemple avec les évolutions récentes dans les méthodes de diffraction et le développement d'analyses structurales *via* la fonction de distribution de paires (PDF) ou encore par les développements méthodologiques en microscopie électronique très haute résolution ou en imagerie RMN qui irriguent progressivement les laboratoires de chimie. Au-delà des semi-conducteurs et métaux simples, le contrôle de la composition chimique et de la microstructure de composés poly-atomiques nécessite une contribution permanente des chimistes du solide. Les ruptures récentes dans le domaine des systèmes à électrons corrélés, des nouveaux supraconducteurs, peuvent également être mentionnées. Enfin, les imageries et modélisations multi-échelles sont passées du statut d'objets d'étude dans les laboratoires de physique à celui d'outils incontournables dans les équipes de recherche de la section 15.

La nécessaire mise en œuvre de nos matériaux pour des développements technologiques fait également progresser leur connaissance. En effet, dans le **processus de mise en forme et d'intégration des matériaux**, la reproductibilité et la fiabilisation imposent une expertise fondamentale de la physico-chimie des solides. En retour, la disponibilité de nombreux composants reproductibles et fiables permet de mener des études comparatives et ainsi de faire avancer la compréhension des matériaux. À titre d'exemple, on peut citer les verres et cristaux pour l'optique, les thermoélectriques, les conducteurs ioniques ou mixtes, les oxydes en couches minces, les nanomatériaux magnétiques, la substitution des métaux nobles en électronique, ou encore les composites thermo-structuraux.

Les interactions avec les **domaines de la santé et de l'environnement** apparaissent clairement comme une source d'innovation dans la synthèse des (nano)-matériaux. En vue d'applications en médecine ou biologie, nos laboratoires optimisent en permanence les matériaux : biomatériaux à porosité multi-échelle contrôlée, nanoparticules hybrides pour l'imagerie et la délivrance ciblée de médicaments... Notre savoir-faire se développe aussi autour de l'incorporation de micro-organismes comme des bactéries, au sein de réseaux inorganiques, ce qui permet d'entrevoir des applications en bio-remédiation.

Du point de vue organisationnel, ces différentes interactions interdisciplinaires peuvent être résumées par la figure 1 qui schématise l'implication relative des différents domaines scientifiques avec la section 15, déterminée par les rattachements secondaires des laboratoires de cette section. Par rapport au même schéma présenté dans le rapport de conjoncture 2014, l'évolution principale concerne le rattachement secondaire à des sections rattachées à l'INSB qui est devenu équivalent aux rattachements à l'INP et à l'INSIS.

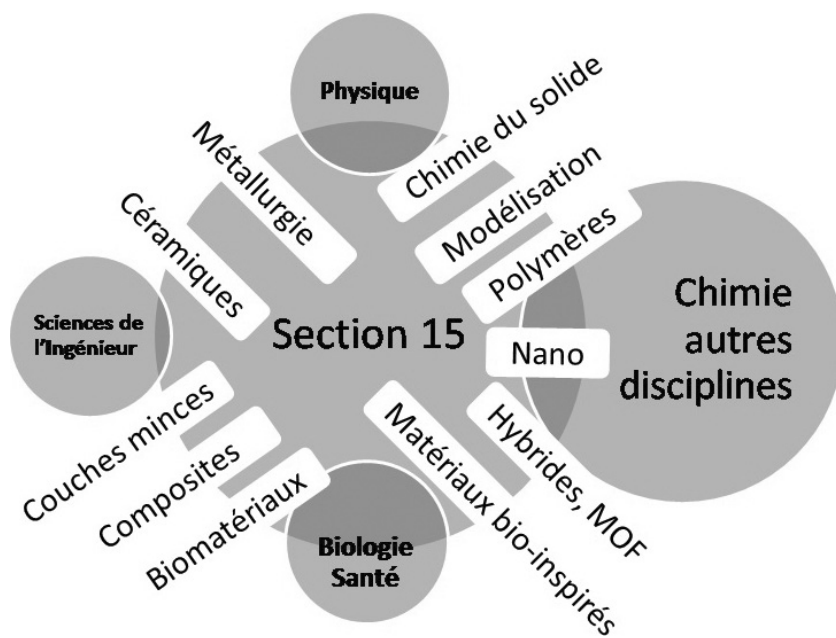


Figure 1 : Schéma représentant le poids relatif des disciplines affichées par toutes les unités de recherche de la section 15. L'aire des disques est proportionnelle au nombre de chercheurs rattachés aux sections secondaires des laboratoires dont la section principale est la section 15.

II. Évolution thématique depuis le précédent rapport

Ces dernières années, la demande sociétale toujours croissante en matériaux fonctionnels de plus en plus performants s'est traduite par une recherche d'innovation forte tant dans les méthodes de synthèse et de mise en forme que dans les techniques de caractérisation. Les évolutions majeures récentes et les tendances actuelles peuvent être illustrées par les exemples suivants qui ne sont pas exhaustifs :

- Les **méthodes de synthèse** à partir de précurseurs moléculaires ou en voie colloïdale se sont diversifiées et sont maintenant étendues à des compositions chimiques très variées non classiquement couvertes par la chimie sol-gel, en élargissant la gamme de température (sels fondus), en utilisant des voies de synthèse sous sollicitations (hautes pressions, mécano-synthèse...) ou des techniques de dépôts comme l'ALD (Atomic Layer Deposition).

- Les **procédés d'élaboration** couplant formulation et mise en forme dont certains initialement développés dans le domaine des polymères, ont été largement étendus à la chimie inorganique : impression 3D et procédés assimilés, extrusion électro-assistée, extrusion réactive, etc. L'activité autour des **procédés de fabrication additive** est en pleine explosion. Ils sont en train de devenir de réels outils de production industrielle de pièces fonctionnelles (polymères, métalliques, céramiques et hybrides) et offrent des perspectives intéressantes parmi lesquelles, la réalisation de pièces complexes (e.g. issues de la modélisation pour optimiser une performance), non réalisables par procédé conventionnel, ou l'intégration de nouvelles fonctions au sein d'une pièce hybride céramique/métal par exemple. Enfin, il faut souligner que les notions d'**éco-conception** sont de plus en plus intégrées dans les diverses étapes d'élaboration d'un matériau et tout au long de son cycle de vie.

- Les **méthodes de caractérisation *in situ*** pour suivre la formation des matériaux, voire même ***operando*** pour se placer en conditions opérationnelles y compris sous pression et en température (piles ou batteries...) sont de plus en plus développées grâce aux progrès récents importants dans le domaine de l'imagerie, des spectroscopies, et des techniques de diffraction et de diffusion.

Tous ces récents développements sous-entendent que les compétences nécessaires pour permettre ces avancées sont multiples et multidisciplinaires. Les exemples suivants non exhaustifs illustrent des avancées récentes dans le domaine des matériaux fonctionnels.

Dans le domaine de l'**hydrogène** et des **piles à combustible**, les travaux se concentrent dans les laboratoires de chimie (50 % des chercheurs), avec une forte contribution des chimistes du solide de la section 15. Les dispositifs actuels montrant déjà une certaine maturité, les travaux visent la rupture technologique, en développant les matériaux de la prochaine génération tout en conservant des approches incrémentales.

Concernant le **stockage électro-chimique de l'énergie**, des avancées récentes importantes ont été réalisées dans le domaine des matériaux d'électrodes positives pour accumulateurs lithium-ion à plus haute densité énergie et pour accumulateurs sodium-ion à bas coût et forte puissance. Dans le futur, il faudra développer des matériaux plus efficaces et fiables pour ces applications en réduisant leur empreinte environnementale, en minimisant la teneur en éléments de ressources rares et critiques et en intégrant les aspects de recyclage.

Dans le domaine des couches minces, la réalisation de mémoires résistives (oxydes, chalcogénures) ouvre des perspectives très intéressantes dans le domaine du **stockage de l'information**. L'apport des chimistes du solide est déterminant pour la synthèse et la mise en forme des matériaux : frittage basse température de céramiques, dépôt contrôlé de couches fonctionnelles, fabrication additive.

Pour ce qui concerne les **matériaux à fonctions optiques**, la recherche de nouvelles formulations chimiques et la mise en œuvre de nouveaux procédés de fabrication, incluant la structuration à diverses échelles, sous-tendent cette thématique. Les matériaux étudiés (oxydes, fluorures, chalcogénures) possèdent différents types d'organisation structurale allant des verres aux monocristaux en passant par les vitrocéramiques et les céramiques. La maîtrise de la cristallisation à l'échelle nanométrique dans les verres pour la réalisation de vitrocéramiques à propriétés contrôlées constitue un enjeu important. De même, des travaux majeurs sont entrepris dans un contexte de forte concurrence internationale sur les céramiques polycristallines, étudiées pour leurs propriétés de transparence dans le visible et/ou l'infrarouge, ou pour des applications dans le domaine des lasers de puissance. La fabrication de verres non-oxydes par synthèse additive commence à apparaître.

La détermination de nouvelles compositions au cœur des activités du chimiste de la section 15 s'appuie aujourd'hui de plus en plus sur la modélisation et l'intelligence artificielle (*deep learning*, *data mining*, etc.). La simulation multi-échelle, qui est un problème plus complexe, se développe également en particulier dans le domaine de la métallurgie.

III. Répartition géographique en 2019 et évolution récente des populations

La section 15 est forte de 308 chercheurs (Ch) affectés dans 68 unités de recherche (chiffres 2018, sans les agents hors structures CNRS). Leur répartition est inhomogène avec 26 unités ne comptant qu'un seul chercheur et 4 unités comptabilisant plus de 15 chercheurs (ICMCB-Bordeaux, SIMAP-Grenoble, IJL-Nancy, IMN-Nantes). La moyenne se situe à 4,5 agents par unité. Si l'on se réfère aux pré-

cédents rapports de conjoncture, le nombre de chercheurs de la section est en diminution régulière (-8%) depuis une dizaine d'années. Le niveau de recrutement de 6,5 Chargé(e)s de Recherche (CR) par an en moyenne n'a pas permis de compenser les départs.

En termes de sites (figure 2), la section 15 est très présente à Grenoble, Paris-centre et Bordeaux, (≥ 25 Ch). Viennent ensuite Toulouse, Montpellier, Caen, Nantes, Nancy, Lyon (16 à 19 Ch), suivis de Orsay-Gif-Palaisseau, Marseille, Rennes, Thiais, Orléans, Lille, Strasbourg, Limoges (10 à 14 Ch). La région Ile-de-France concentre au total 56 Chercheurs.



Figure 2 : Répartition géographique des chercheurs (Ch) de la section 15 par site.

La figure 3, où les effectifs de chercheurs (E) sont comptabilisés par délégation régionale (DR), apporte un éclairage un peu différent. Ainsi, la DR17 (Bretagne-Pays de la Loire) peut se comparer aux DR11 (Alpes) et DR15 (Aquitaine), en regroupant les forces de trois sites (Nantes, Rennes, le Mans). La situation est similaire pour la DR08 (Centre-Limousin-Poitou-Charente) qui, en nombre de chercheurs, rivalise avec la DR02 (Paris-Centre) et la DR07 (Rhône-Auvergne), grâce à l'addition des effectifs d'Orléans et de Limoges.

La figure 3 montre également le nombre de chercheurs recrutés (R) sur les concours CR 2014-2019, par délégation régionale. La pondération par l'effectif total (E) conduit au taux de recrutement (T) dans une zone géographique donnée. Ces chiffres ne sont en aucune

manière le reflet d'un solde positif des populations de chercheurs puisque les départs ne sont pas intégrés dans la réflexion. Les entrées/départs par mutation ne sont pas non plus pris en compte.

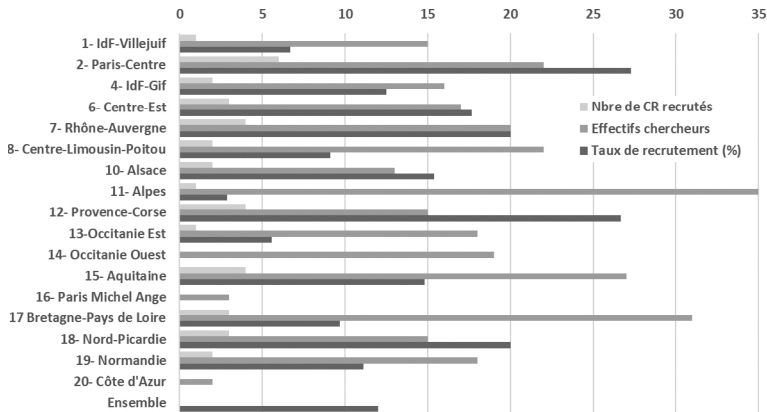


Figure 3 : Histogrammes des effectifs chercheurs (E) et des chercheurs recrutés (R) entre 2014 et 2019 pour la section 15, par délégation régionale. Le taux de recrutement est défini comme le ratio recrutés-effectif.

Les DR02 (Paris-Centre) et DR12 (Provence-Corse) présentent le taux de recrutement le plus élevé avec un ratio de 27%, la moyenne nationale se situant à 12%. Viennent ensuite, les DR07 (Rhône-Auvergne) et DR18 (Nord-Picardie), à égalité à 20%. La comparaison avec le rapport de conjoncture de 2014 montre que les recrutements CR ont fortement progressé en DR12, T passant de 7 à 27%. L'Île-de-France, toutes DR confondues, a également vu son niveau de recrutement croître de 10% en 2014 à 16% en 2019. Par ailleurs, la forte capacité à recruter des unités en DR07 et DR18 se confirme (28% et 15%, respectivement en 2014). Les DR06 (Centre-Est), DR10 (Alsace) et DR15 (Aquitaine) présentent aussi un taux de recrutement supérieur à la moyenne nationale, tiré par les grosses unités que sont l'IJL-Nancy, l'IPCMS-Strasbourg et l'ICMCB-Bordeaux.

Les niveaux de recrutement les plus faibles (0 à 6%) sont observés dans les DR14 (Occitanie-Ouest), DR11 (Alpes), et DR13 (Occitanie-Est), à comparer à 5%, 14%, et 19% respectivement en 2014.

Il est également important de discuter de la parité au sein de la section 15.

Le tableau 1 donne la représentation des femmes au sein de la section pour les Chargé(e)s de recherche (CR) et Directeurs(rices) de recherche (DR2). Sur les 11 dernières années, 31% des DR2 recrutés ont été des femmes, ce qui est bien supérieur aux 24% qu'elles représentent aujourd'hui dans la section.

Tableau 1 : % de femmes recrutées parmi les chercheur(e)s de la section 15.

	Recrutements (%)		Effectif total (%)
	2009-2019	2015-2019	2018
CR Femmes	36	34	37
DR2 Femmes	31	24	24

Ce constat, très positif dans un contexte où le CNRS souhaite améliorer la parité chez les

chercheur(e)s, est cependant atténué par le taux de recrutement de ces 4 dernières années, retombé à 24%. Dans la catégorie des CR, les femmes représentent aujourd'hui 37% des effectifs. Les dernières campagnes de recrutement CR ont légèrement tiré ce ratio vers le bas, avec 36% de femmes recrutées sur les 11 dernières années, et 34% sur 4 ans. Ce constat brut doit cependant être analysé au regard de la proportion de candidates admises à concourir qui est de seulement 27% sur le concours CR et de 19% sur le concours DR2, en moyenne sur la période 2015-2019. Au bilan, la part des femmes recrutées en section 15 est donc supérieure à leur représentativité dans les deux concours CR et DR2.

IV. De la nécessité d'une recherche exploratoire de qualité

La recherche amont est primordiale pour assurer l'avenir d'un grand pays industriel. La France, qui se veut un compétiteur économique fort dans le monde, doit renforcer cet aspect de la recherche scientifique. Notre société exploite aujourd'hui les résultats de travaux exploratoires menés durant les dernières décennies. Les matériaux de demain, que la section 15 s'intéresse à prédire, leur synthèse, leur mise en forme et leur intégration dans des systèmes, ne pourront pas être obtenus par simple extrapolation des connaissances actuelles. Ceci vaut pour toutes les familles de matériaux, des matériaux fonctionnels aux matériaux de structure.

La recherche exploratoire a pour ambition principale d'accroître et d'élargir les connaissances. Les grandes avancées scientifiques et techniques n'ont généralement pas été programmées. Ni le succès d'un projet ni le temps nécessaire pour y accéder ne peuvent en général être prédits. La recherche exploratoire a l'ambition de répondre à des besoins

vitaux pour la société humaine en s'attaquant à des problèmes théoriques ou fondamentaux, en forte résonance avec les besoins à long terme. En fait, la plupart des ruptures technologiques sont généralement le résultat de recherches amont. Nous pouvons rappeler l'exemple des premiers travaux, datant des années 90 et sans visée applicative identifiée à cette époque, ayant conduit au développement des technologies additives. Ces procédés connaissent depuis 2013 (une vingtaine d'années plus tard!) un fort engouement pour la fabrication de pièces métalliques ou céramiques fonctionnelles, car ces dernières présentent des propriétés qui restent hors d'atteinte par la mise en œuvre de procédés conventionnels. Elles trouvent aujourd'hui des applications nouvelles et nombreuses dans les grands secteurs de la santé, de l'énergie, des transports et des TIC, et ces technologies font partie intégrante de l'usine du futur.

On distingue souvent, et par commodité, le rôle de la science portée par la curiosité de celui de la recherche visant à répondre à l'expression des grands besoins industriels. En réalité, ces deux volets de la recherche sont tout à fait complémentaires et s'alimentent mutuellement. La recherche finalisée prend appui sur les acquis de la recherche fondamentale pour répondre à de grands défis qui conditionnent l'avenir de notre société, comme la production, le stockage et la transformation de l'énergie, le stockage et le traitement de l'information, l'élaboration de matériaux de biosuppléance, etc. En chimie des matériaux, des nanomatériaux et des procédés (section 15), la recherche amont est donc, en d'autres termes, indispensable pour apporter les connaissances fondamentales nécessaires à l'innovation qui constitue l'aboutissement logique de la démarche (*bottom-up*). Elle peut également se saisir de problématiques liées à l'application pour, par exemple, lever un verrou nécessaire à l'exploitation d'un nouveau matériau sur des bases pertinentes de la chimie du solide, de l'acquisition des données thermodynamiques ou de la maîtrise des transformations de la matière, inhérentes au procédé de mise en œuvre, tout ceci étant étayé par des outils de modélisation performants.

Une brève analyse efface donc la frontière artificielle posée entre recherche exploratoire, qui laisse la liberté au chercheur de définir sa recherche en prenant appui sur sa créativité, et recherche finalisée qui vise à répondre à court ou moyen terme à un besoin spécifique de la société et conduire à des applications immédiates. Les deux approches se distinguent néanmoins par leurs échelles de temps caractéristiques, le long terme pour la recherche exploratoire, et le court terme pour la recherche ciblée. Néanmoins, « comprendre pour prévoir le futur » constitue le meilleur investissement qui soit, au niveau national, pour permettre une recherche réactive en situation compétitive.

Cette complémentarité entre recherche fondamentale et recherche appliquée impose de conserver un équilibre entre les modes de financements, ce qui n'est pas encouragé, voire difficile à réaliser, dans le cadre de la politique actuelle de la recherche. Le financement de la recherche amont a fortement évolué au cours de ces 10 dernières années, avec la baisse progressive des fonds récurrents des laboratoires et l'accroissement des budgets dédiés aux appels d'offres, que ces derniers soient lancés par l'ANR, par les Régions, par l'Europe... Cette évolution tend à orienter les thématiques de recherche de manière à satisfaire des attentes sociétales définies à court ou moyen terme, et a contribué à détourner le chercheur de sa capacité à exploiter sa propre créativité et à développer une recherche amont exploratoire, normalement associée à une prise de risques. Dans ce contexte, il est important de redynamiser, au profit des chimistes de la section 15, leur culture exploratrice de la recherche de nouvelles phases et de nouveaux composés, présentant des propriétés physiques exacerbées ou nouvelles, ainsi que des procédés associés. L'une des missions des plus fondamentales des chercheurs de la section 15 doit en effet consister à « alimenter » en nouvelles compositions les communautés scientifiques et techniques concernées par l'élaboration, la mise en forme, la structuration de nouveaux matériaux, que ce soit sous forme de cristaux, de couches minces ou de matériaux massifs. Cette recherche exploratoire

doit rester libre, c'est-à-dire orientée selon des critères de curiosité et d'intuition scientifiques définis par les chercheurs eux-mêmes. Un certain goût de l'aventure doit par conséquent être (re)-valorisé en chimie du solide.

La recherche de financement est par ailleurs une tâche chronophage. Le temps consacré au montage de projets pour répondre aux appels d'offre, dont le taux de succès reste très faible, ainsi que le temps consacré à la gestion administrative et financière des projets, réduit d'autant la part précédemment réservée à l'activité scientifique, à l'encadrement et à la formation. À ceci s'ajoute la prolifération aussi polymorphe qu'incontrôlée des expertises engendrées par l'exploitation des dossiers soumis en réponse aux appels d'offres. Ces contraintes imposées par les modes de financement mis en place depuis une décennie deviennent antinomiques avec cette conception de la recherche exploratoire basée sur une formation solide dans le cadre conceptuel et disciplinaire de la section 15.

V. De la nécessité d'une recherche exploratoire pluridisciplinaire

Les chapitres précédents nous ont appris que la recherche, dans le périmètre de la section 15, s'adresse à une grande variété de systèmes et de propriétés physico-chimiques. Nous avons également vu que cette recherche, à fort caractère exploratoire, se laisse guider par des intérêts et des méthodologies différentes, en synergie les uns avec les autres, allant du développement de produits et de procédés compétitifs en contexte industriel à la recherche en laboratoire à visée fondamentale, inventive et disruptive. De la production d'énergie à la métallurgie d'élaboration en passant par la photonique, la multiférocité, les matériaux micro- et nano-composites hautes performances ou le recyclage, toutes ces pro-

blématiques livrent leur lot de contributions fondamentales et de transferts technologiques. Ces recherches s'appuient sur des concepts théoriques élémentaires, ceux qui fondent les premiers éléments d'une science, et peuvent suivre des chemins nouveaux vers des champs d'exploration vierges, en inventant des outils théoriques, expérimentaux et numériques à la pointe de l'état de l'art.

Cette puissance d'invention requiert une expertise pluridisciplinaire assise sur des collaborations nouées sur le long terme, au niveau mondial. Les activités de recherche des équipes de la section 15 sont, de ce point de vue, tout-à-fait exemplaires. On peut en mentionner quelques exemples, sans souci d'exhaustivité ni de hiérarchie : une Mott-tronique à base de matériaux dans lesquels une transition isolant-métal peut être contrôlée par de subtils effets thermomécaniques, et à fort potentiel pour le stockage de l'information à faible coût énergétique ; les matériaux de type MOFs, fascinantes architectures moléculaires poreuses, dont on espère une utilisation pour le stockage réversible de gaz ; les couches minces de matériaux magnétiques à architectures complexes pour des applications de transfert énergétique ; les nouveaux matériaux céramiques, métalliques et composites qui peuvent être déclinés à l'échelle nanométrique ; la fabrication d'architectures complexes, issues de la simulation, par technologie additive incluant toute une chaîne numérique ; les verres pour l'optique et le stockage des données et les vitrocéramiques ; la prédiction de structures et propriétés par simulations numériques *ab initio* ou multi-échelles.

L'exploration des grands thèmes de la section permet d'obtenir des résultats solides et fiables. Le benchmarking, les changements d'échelle et la confrontation numérique-expérimental sont aussi cruciaux. L'investigation de nouvelles pistes – chimie biomimétique ou bioinspirée, nanotechnologies, métallurgie numérique, etc. – parfois risquée, à court terme, en termes de résultats publiables, est enrichissante au plus haut niveau sur le plan intellectuel car elle promeut l'esprit scientifique et l'initiative. Ceci nécessite aussi un grand savoir-faire, dont la transmission aux jeunes chercheurs est un

vrai enjeu. Cela demande également un effort de pluridisciplinarité active, de la mécanique quantique à la mécanique des milieux continus, en passant par la physique du solide et la chimie de synthèse. Comme décrit dans le chapitre 2, de nombreux laboratoires de la section 15 sont liés à d'autres sections de l'INC, de l'INP, de l'INSIS et de l'INSB. Le champ d'investigation en est d'autant plus vaste et crédité d'un sérieux scientifique garanti par des interactions constantes entre différents spécialistes.

Le paysage de la recherche en science chimique des matériaux, stimulée par la mixité thématique et méthodologique, est modifié par les nouveaux défis sociétaux du XXI^e siècle. La chimie du solide, qui a parfois trop misé sur des activités de « *screening* », doit participer à un développement rationnel de l'« *artificial intelligence* ». Les préoccupations environnementales orientent et remettent en question les moyens de production et de stockage de l'énergie, que ce soit le nucléaire pour l'électricité, les batteries, la production et le stockage de l'hydrogène, ou pour les matériaux allégés dans l'industrie aéronautique et spatiale... Certains paradigmes sont renversés par le développement des moyens de calcul (big data, simulations quantitatives à différentes échelles) et d'investigation par imagerie et spectroscopies *in situ* et *operando*. Les enjeux de la recherche expérimentale doivent être redéfinis, mais aussi affirmés avec force et conviction.

Le CNRS est l'un des seuls organismes de recherche capable à la fois de promouvoir la veille et la percée technologiques, soutenues en priorité par les industries concernées, et de cultiver avec constance une recherche de fond dont le caractère exploratoire et pluridisciplinaire augmente la portée. Il faut recruter des experts, des théoriciens et des expérimentateurs, des spécialistes du numérique et de l'instrumentation. Sur ce dernier point – l'instrumentation – il faut savoir garder un équilibre entre le développement de moyens légers et originaux en laboratoire, et le recours aux très grands instruments (synchrotrons, sources de neutrons, accélérateurs, spectromètres et microscopes électroniques haute résolution...).

Les personnels de soutien à la recherche ont toujours un rôle majeur à jouer. Il faut aussi garder un maillage académique du territoire français, embaucher et soutenir de jeunes chercheurs sans pour autant exiger de leur part une planification artificiellement et exagérément détaillée. Des initiatives ont germé, notamment par le biais de GDR et de Fédérations de Recherche, dont l'effet structurant et fertilisant est une des clés les plus vertueuses de l'action du CNRS. Des réflexions en cours concernent la métallurgie (cf. les Journées prospectives *Nouveaux alliages métalliques*, 2018), la chimie numérique... Il faut encourager ces actions tant dans les disciplines de taille critique que dans celles au développement explosif.

Pour conclure, les unités de recherche de la section 15 s'attachent à résoudre des problèmes scientifiques posés à la planète par certains grands défis liés à l'énergie, l'environnement et la santé, et par les enjeux technologiques du calcul numérique et de la communication. L'exploration par l'expérimentation et la modélisation basée sur les principes élémentaires régissant les principales disciplines de la science moderne sont la clé de découvertes et inventions importantes.

VI. Contexte européen et international

S'appuyant sur les réalisations et les succès des précédents programmes comme Horizon 2020, un plan ambitieux de financement de l'Union Européenne vient d'être lancé. Horizon Europe vise à promouvoir la coopération et l'excellence scientifique à l'échelle européenne sur la période 2021-2027 avec ou sans le Royaume Uni. L'accent sera mis sur des priorités stratégiques, telles que l'accord de Paris sur le changement climatique. À travers plusieurs piliers, ce programme propose de soutenir la recherche exploratoire et les échanges

entre chercheurs autour de problématiques sociétales et de la compétitivité industrielle. Dans ce contexte, les matériaux et les procédés avancés jouent un rôle majeur pour répondre aux problématiques des pôles « *Numérique et Industrie* » et « *Climat, énergie et mobilité* » du pilier « *Problématiques mondiales et compétitivité industrielle* ». Les (nano)matériaux innovants et les procédés associés seront donc incontournables pour adresser les enjeux liés au renouveau industriel (techniques de fabrication, matériaux avancés, industrie propre et à faible émission de carbone...) et à l'énergie (production, transformation, stockage d'énergie propre, mobilité intelligente...). De nombreux moyens sont déjà déployés en faveur des technologies du stockage électrochimique de l'énergie et de l'hydrogène (*Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*) tant au niveau des matériaux que des systèmes pilotes.

De plus, la promotion d'une *science ouverte* va s'accroître avec de nouvelles pratiques qui imposeront à terme, le libre accès aux publications et aux données, et ce dans le but d'améliorer la diffusion et l'exploitation des résultats de la recherche publique.

Au niveau international, les matériaux avancés sont également au cœur des recherches stratégiques, telles que le programme prioritaire de l'Allemagne dans le domaine de la métallurgie (alliages à haute entropie, alliages à composition complexe, superalliages...) ou de l'énergie (batteries...). Aux USA, la National Science Foundation, affirme dans son plan stratégique (*Strategic Goal 1: Expand knowledge in science, engineering, and learning*) son soutien à la recherche fondamentale et à risque, considérée comme « *un investissement capital pour la nation* », dont les produits et procédés novateurs ne sont pleinement appréciés qu'après des décennies. Elle promeut également l'accès libre aux données et l'interdisciplinarité.

Au niveau international, le CNRS a sa propre vision qui vise la coopération aux bénéfices des équipes et son implication dans des infrastructures de recherche et des opérations scientifiques internationales. Ainsi, sa participation aux grands instruments de recherche

(ILL, ESRF, SOLEIL, RMN, MET, IDRIS, futur ESS...) permet aux chercheurs de la section 15 l'accès aux équipements les plus performants dans un environnement scientifique stimulant et international. Parmi les Unités Mixtes Internationales du CNRS, la section 15 porte le laboratoire LINK (Laboratory for Innovative Key Materials and Structures) au Japon sur des thématiques autour de nanocomposites fonctionnels pour des applications optiques et énergétiques. De plus, une nouvelle structuration des collaborations internationales est proposée sur une base simplifiée afin de mener des actions exploratoires (*International Emerging Actions*), de consolidation (*International Research Networks, International Research Programs*), de structuration (*International Research Laboratories*) et d'intégration (*International Research Centers*). Au niveau de la section 15, des réseaux internationaux de type IRN (ex-GDRI) existent déjà et portent sur les nanomatériaux multifonctionnels contrôlés (GDRI franco-canadien NMC), les nanoalliages (IRN franco-italien Nanoalloys) ou encore le stockage et la conversion d'énergie (IRN franco-australien FACES).

VII. Les disciplines en danger (enseignement et recherche)

Des modifications substantielles des programmes des baccalauréats généralistes scientifiques ont été mises en œuvre depuis le précédent rapport de conjoncture (2014) et vont continuer à être appliquées dans les prochaines années (nouveau baccalauréat dès 2020). Ceci impacte, entre autres, le type et le niveau des connaissances de base des étudiants en physique, en chimie mais aussi en mathématiques. Parallèlement, le pic démographique de la génération millenium, et le développement de l'apprentissage en particulier ont induit une augmentation des effectifs des étudiants dans l'enseignement supérieur et un élargissement de leurs profils. Il en résulte que

les disciplines réputées difficiles et/ou nécessitant un temps d'apprentissage important, tels que la cristallographie et la thermodynamique notamment, attirent moins les étudiants. Bien que le recours aux pédagogies innovantes *via* les cours en ligne, l'utilisation d'outils numériques pour aider la prédiction de diagrammes de phases et/ou la visualisation de structures cristallines, se développe, l'appétence des étudiants pour ces matières est en nette baisse. Par conséquent, les temps consacrés à l'enseignement de la thermodynamique et de la cristallographie se sont paradoxalement considérablement réduits dans les universités et écoles d'ingénieurs françaises. La situation de la thermodynamique est particulièrement critique. Elle vient souvent compléter d'autres disciplines plus classiques de la physique et la chimie. Le problème est identifié de longue date dans l'enseignement supérieur, et de nombreux efforts ont été réalisés pour y remédier. Cependant, le lien théorie / applications, essentiel pour faciliter la compréhension des étudiants, est beaucoup moins simple et intuitif en thermodynamique que dans d'autres disciplines. La section 15 est convaincue de la nécessité de maintenir les compétences et expertises, en particulier en ce qui concerne la thermodynamique des interfaces et des matériaux à haute température. Elle est consciente de sa faiblesse numérique et de sa dissémination sur l'ensemble du territoire. Le GDR TherMatHT joue un rôle important et fédère une communauté active. Il faut aussi noter la progression de la modélisation multi-échelle en thermodynamique. Cependant, l'expertise expérimentale reste indispensable pour obtenir les données fiables. Celles-ci sont nécessaires et recherchées pour les nouveaux procédés comme la fabrication additive mais aussi pour la durabilité des matériaux (succès de l'école thématique 2018 M2Cor). Le même constat peut être étendu au niveau européen. Comme souligné dans le précédent rapport, les enseignements et les formations en thermodynamique et en cristallographie demeurent indispensables pour mener les activités scientifiques de la section 15 et de ce fait, ces disciplines et les thématiques associées sont toujours en danger. Plus généralement, on

peut considérer que l'enseignement de la chimie du solide, en tant que discipline fondamentale et parfaitement complémentaire à celui en sciences des matériaux, est globalement en danger. Une nette réduction du volume d'enseignement en chimie du solide est observée depuis quelques années liée à un glissement continu vers un enseignement plus directement en lien avec les objectifs appliqués de la recherche. S'il est compréhensible que d'un point de vue sociétal, un enseignement de la science des matériaux directement basé sur les enjeux actuels soit soutenu, il est discutable que cela soit fait au détriment de l'enseignement des bases fondamentales de la chimie du solide. Lors de récentes actions nationales autour de la chimie du solide et de la cristallologénèse (ANF ChimSol Caen 2015, réseau Cristech) est même apparu le terme « chimie du solide exploratoire » soulignant la perte de vitesse de la chimie du solide française, discipline fondamentale qui fut une place forte au niveau mondial. Cependant, créer de nouveaux solides, par exemple par des stratégies d'inter-croissances en imaginant une structuration à l'échelle atomique, puis structurer ces nouveaux solides à une échelle donnée en mettant en œuvre un procédé, prédire certaines de leurs propriétés et/ou leur modification par des opérations de mise en forme, demeurent des défis majeurs. Leurs résolutions nécessitent de pouvoir calculer la stabilité des édifices, de caractériser l'organisation de la matière sur une large gamme d'échelle, en distinguant les propriétés en volume, en surface et aux interfaces, etc. en continuant à faire largement appel aux connaissances fondamentales de la chimie du solide.

Ainsi, le défi consiste à former des étudiants (souvent en grand nombre) capables de traiter des problèmes plus complexes, car à différentes échelles, et ce malgré un bagage scientifique plus léger, étant en partie la conséquence d'un volume horaire réduit. Dans ce contexte contraint, des opportunités existent malgré tout, résultant de la baisse constante du prix des équipements de caractérisation devenant accessibles pour la formation doctorale et la formation en stage, dès le niveau L2

jusqu'au niveau M2. Ces possibilités compensent en partie la diminution du volume d'enseignement pratique, devenu une variable d'ajustement lors des dernières accréditations universitaires afin de limiter les suppressions de cours magistraux et/ou TD. Naturellement, des pédagogies déductives, plus adaptées aux étudiants actuels, et en vogue peuvent être mises en place pour combler les manques, mais cela doit être soutenu financièrement, au niveau des moyens et par un volume horaire d'enseignement clairement dédié.

Concernant les moyens de caractérisation, plusieurs problèmes se dessinent. Pour poursuivre le développement de recherches de haut niveau en cristallogénèse notamment liées aux développements instrumentaux récents, comme la montée en puissance des analyses 3D (sonde atomique, tomographie X) et de *l'in situ / operando*, il est vital de préserver l'accès au réseau tels que METSA, aux Infrastructures de Recherche (IR) et aux Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR). De même, la fermeture fin 2019 du réacteur Orphée (diffusion et diffraction de neutrons) associé au Laboratoire Léon Brillouin entraîne un risque de perte d'expertise en neutronique, domaine où la France est encore bien identifiée, mais aura aussi pour conséquence, faute de temps d'accès, la difficulté de résoudre dans des délais satisfaisants les nombreux problèmes de diffusion élastique et inélastique émanant des laboratoires. La fermeture d'Orphée va également créer un grand vide dans la formation des étudiants et des jeunes doctorants des laboratoires Français. D'autre part et à un degré moindre, la jouvence de l'ESRF risque de provisoirement handicaper la communauté mais offrira ensuite des sources de rayonnement X permettant des performances accrues en caractérisation structurale par exemple.

Il est donc souhaitable que les chercheurs qui s'investissent fortement dans les développements expérimentaux associés aux domaines moins « en vogue » que sont la thermodynamique, la cristallographie et la chimie du solide ne soient pas pénalisés tant dans leur carrière, que dans leur taux de réussite aux différents appels d'offres. Ce dernier point est

essentiel pour financer et former les docteurs, experts de demain, mais aussi pour maintenir et améliorer les parcs instrumentaux et les outils numériques associés au bénéfice de l'ensemble de la communauté scientifique. En parallèle et en direction des futures générations, il est crucial que les chercheurs de la section 15 et les enseignants chercheurs associés s'impliquent dans le montage ou l'habilitation de masters, en particulier internationaux, ainsi que dans les AAP « École Universitaire de Recherche » ou « Structuration de la Formation par la Recherche dans les Initiatives d'excellence » afin d'intégrer l'apprentissage de toutes ces disciplines de la manière la plus pertinente, en rendant plus attractives les formations associées.

VIII. Recommandations

Les activités de la section 15, déclinées selon les axes synthèse-caractérisation-propriétés, s'enrichissent par les apports des communautés « historiques » du découpage institutionnel CNRS (chimie, physique, sciences du vivant, sciences de l'ingénieur). Ce constat leur confère un caractère éminemment pluridisciplinaire, en faisant du périmètre statutairement défini comme « chimie des matériaux, des nanomatériaux et des procédés » le pilote scientifique qui alimente au mieux le développement et l'exploitation de la science des matériaux sur le territoire national. Cet aspect pluridisciplinaire doit être poursuivi et renforcé, en accroissant le rôle fédérateur à partir des contacts déjà établis ou à constituer avec les communautés en demande d'outils « matériaux » de plus en plus performants et fonctionnels (par exemple, les matériaux pour l'énergie, pour le bio-médical, pour l'aéronautique, pour l'optique, etc.). Ce pilotage s'appuie sur les savoirs de la section 15 : l'élaboration des nouvelles pistes pour la mise au point de matériaux innovants, la compréhension conceptuelle de la liaison chimique sous-jacente, la concrétisation en

laboratoire, puis, quand il y a lieu, le transfert vers le monde socio-économique. Admettre qu'au sein des unités de recherche de la section 15, l'on retrouve un très grand recouvrement entre le périmètre scientifique historique au CNRS (chimie des matériaux/ métallurgie/ procédés) et le domaine (internationalement reconnu) de la science des matériaux, doit aussi stimuler une réflexion en amont sur l'adéquation des contours des instituts et des sections de l'institution CNRS toute entière. Cela permettrait de mettre au point une organisation en disciplines plus moderne et efficace, en se conformant à ce qui est largement adopté dans des pays tout aussi performants (sinon plus) que la France tant en recherche fondamentale qu'appliquée.

Par rapport à l'organisation thématique interne de la section, on observe par moments (recrutements, promotions, définition des grands axes prospectifs de recherche), un découpage et un manque de cohésion entre chimie du solide et métallurgie. Cette dichotomie est réaliste si l'on considère les différences thématiques et l'organisation en unités de recherche mais elle va au détriment d'une synergie optimale au sein de la communauté « matériaux » selon les lignes fondatrices esquissées précédemment. Étant donné que les missions et la philosophie de travail de ces deux sous-disciplines sont pratiquement identiques (synthèse-caractérisation-propriétés), il est souhaitable que l'ensemble des matériaux traités au sein de la section 15 soit considéré comme une seule et même entité homogène évitant ainsi que la nature différente de la liaison chimique puisse être prétexte à un cloisonnement artificiel en sous-disciplines.

La forte augmentation du caractère pluridisciplinaire des activités conduites au sein de la section 15 a été soulignée à plusieurs reprises tout au long de ce rapport, en insistant sur la force motrice des activités en chimie des matériaux (ou, plus généralement, en « science des matériaux ») capables d'associer des disciplines avoisinantes (physique, biologie, ingénierie). Ce constat doit aider à fixer les lignes directrices définissant le profil du « scientifique des matériaux du troisième millénaire », à recruter

et/ou à former au sein des unités de recherche. Il s'agit de chercheur(e)s capables d'opérer au niveau d'une ou de plusieurs facettes du triptyque fondateur de la discipline (synthèse-caractérisation-propriétés) mais autant que possible en liaison avec d'autres domaines scientifiques qui font la demande de matériaux performants et parfaitement élaborés, compris et optimisés. Le recrutement récent de plusieurs scientifiques ayant fait la première partie de leur carrière à l'étranger montre que le pouvoir d'attraction de la section est en croissance constante, car, encore une fois, le réservoir potentiel est très large si l'on considère les unités de recherche de la section 15 comme le choix naturel pour tout jeune chercheur avec un profil à fort caractère « science des matériaux ». Cette tendance est à consolider dans les années à venir. Il serait à ce titre souhaitable que les unités de recherche bénéficient de financements récurrents suffisants des organismes et, que l'ANR dédie la moitié de ses financements à de vrais appels blancs, avec un taux de réussite significatif (i.e. 20 à 30 %).

L'importance de la modélisation quantitative à tous les niveaux d'études des matériaux est soulignée à plusieurs reprises dans ce rapport. Il s'agit de faire correspondre, à chaque étape de la trilogie synthèse-caractérisation-propriétés, des études théoriques qui s'appuient sur des modèles énergétiques rigoureux et fiables (souvent basés sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)), et qui peuvent être couplés à des calculs de mécanique statistique (Dynamique Moléculaire classique ou « ab-initio » ou Monte-Carlo). Si les calculs basés sur la DFT présentent un caractère prédictif affirmé, ils sont également nécessaires au développement de champs de force capables d'accéder à des échelles de taille et de temps supérieures. Ces derniers outils sont nécessaires si l'on vise l'étude d'effets multi-échelle.

Les dernières années ont été le théâtre d'un essor sans précédent d'utilisation et applications de la modélisation à l'ordinateur au sein des unités de la section 15. En guise de recommandation, il est souhaitable que la modélisation ne soit pas considérée et/ou utilisée

comme un simple outil de support capable de sortir des « chiffres » des codes de calcul « clés en main » accessibles en ligne, mais qu'elle devienne encore plus un instrument stimulant la compréhension des matériaux (éventuellement contribuant à en prédire de nouveaux) en partant de la connaissance de leur liaison chimique.

L'approche « *machine learning* » (exploitation de bases de données quantitatives pour prédire les propriétés de nouveaux matériaux à l'aide d'algorithmes inspirés par l'intelligence artificielle) fait ses premières apparitions dans la communauté « matériaux » française avec quelques années de retard par rapport à d'autres pays européens et d'outre-atlantique. Le défi est immense, aussi bien dans le domaine matériel (des machines bien spécifiques sont nécessaires pour mener à bien le projet), numérique (les algorithmes ne sont pas encore tout à fait disponibles pour un usage étendu à toute la communauté), scientifique (les interactions multidisciplinaires entre spécialistes des matériaux, de la chimie, de l'informatique, de l'algorithmique, du numérique, etc. sont indispensables). Dans ce contexte, il est nécessaire d'insister sur la priorité à donner aux modélisations quantitatives capables de se confronter à la réalité expérimentale de la manière la plus réaliste possible tout en faisant appel aux schémas théoriques les plus performants. Ce sont les ingrédients indispensables pour profiter à plein de la puissance attendue de l'approche « *machine learning* » dans tous les domaines couverts par la section 15 et, plus généralement, dans tous les domaines attenants à la science des matériaux.

Conclusion

La chimie des matériaux, les procédés et les nanomatériaux se trouvent au centre d'enjeux sociétaux importants tels que les nouvelles technologies qui sont plus économes en énergies fossiles ; l'intelligence artificielle qui s'ap-

puie sur des puissances de calcul toujours accrues nécessitant la mise en œuvre de matériaux quantiques ; les procédés innovants comme la fabrication additive céramique, métallique et demain hybride, plus économes en matière et énergie ; la santé avec la vectorisation via des matériaux hybrides ou l'utilisation de capteurs toujours plus performants basés sur des matériaux multi-fonctionnels, etc.

La conception des matériaux du futur repose sur la connaissance de la liaison chimique et est guidée par différentes approches complémentaires : « screening », biomimétisme et théorie, ce dernier outil venant en support ou même en mode prédictif. Cette compétence doit rester le cœur de métier de la section 15 avec son triptyque « synthèse, structure, propriété » pour lequel les nouveaux entrants doivent être formés.

Dans un contexte très compétitif vis-à-vis des enjeux, avec une politique très incitative

des grandes nations (USA, Chine, Allemagne...), notre science ne peut se concevoir qu'à l'échelle européenne. Les chercheurs de la 15 doivent donc profiter de leurs collaborations internationales et nombreuses relations industrielles pour le montage de réseaux européens. À cet effet, les structurations nationales (GDR, outils du PIA..) pourraient servir d'organes de réflexion sur la stratégie européenne.

En termes d'efficacité, le fait de retrouver des matériaux ou de la science des matériaux à l'INC, l'INP, l'INSIS, l'INSU, l'INSB et l'INEE montre bien que le cloisonnement en sections pourrait être vu comme une faiblesse. C'est pourquoi, dans un contexte de diminution de l'emploi scientifique, il est impératif d'optimiser la complémentarité des profils de postes entre Instituts, la section 15 s'interrogeant d'ailleurs sur la pertinence des sections interdisciplinaires.

SECTION 16

CHIMIE ET VIVANT

Composition de la section

Boris VAUZEILLES (président de section), Carine VAN HEIJENOORT (secrétaire scientifique), Claire BEAUVINEAU, Yves BLÉRIOT, Ewen BODIO, Célia BONNET, Corinne BURÉ, Mirjam CZJZEK, Touati DOUAR, Maria DUCA, Katia DUQUESNE, Gilles GUICHARD, Gilles LABESSE, Emeric MICLET, Laurent MICOUIN, Sandrine OLLAGNIER DE CHOUDENS, Pierre-Yves RENARD, Didier ROGNAN, Sylvain ROUTIER, Odile SCHILTZ, Frédéric SCHMIDT, David TOUBOUL

Résumé

Situées à l'interface des sciences du vivant, les recherches menées dans le périmètre de la section 16 relèvent d'une chimie multifacettes, fortement intégrée avec la biologie, la physico-chimie, la biophysique et les méthodes analytiques. Elles reposent sur un décloisonnement disciplinaire unique, qui en fait à la fois la richesse et la diversité.

Ces recherches visent des applications dans tous les domaines liés au vivant, que ce soit en biologie fondamentale, ou dans les champs environnementaux ou thérapeutiques. La chémobiologie couvre une partie croissante de cette aire disciplinaire, en recouvrement partiel et en interaction constructive avec la chimie médicinale, qui de son côté explore des espaces chimiques inédits. De nouvelles approches, de nouveaux outils moléculaires et analytiques permettent d'étudier les processus du vivant et de les contrôler, ou les moduler,

notamment pour des applications diagnostiques ou thérapeutiques. Les grandes familles de molécules du vivant, ainsi que les métaux présents dans le vivant, et les mécanismes biochimiques à la base du vivant, sont l'objet d'études intégrant de plus en plus des développements analytiques de pointe et des outils moléculaires originaux. Les sondes moléculaires intelligentes et la chimie de bioconjugaison se développent et s'adaptent aux conditions réactionnelles imposées par les systèmes vivants, conduisant à une chimie contrôlée *in cellula*, voire *in vivo*. Les substances naturelles, le criblage, les chimiothèques ou les collections d'extraits trouvent de nouveaux développements, en association avec les approches de modélisation, de biologie structurale intégrative, et les approches « omiques ». Enfin, l'étude des mécanismes enzymatiques ouvre vers les biotechnologies, la biocatalyse et la biologie de synthèse, disciplines dans lesquelles l'apport de la chimie est appelé à être déterminant.

Introduction

Les chercheurs de la section s'intéressent à interroger les mécanismes du vivant, en les abordant d'un point de vue, et avec un langage de chimiste. Les questions qu'ils abordent portent essentiellement sur le développement d'objets moléculaires et de méthodes analytiques pour la compréhension et la modulation de processus biologiques fondamentaux, normaux ou pathologiques, avec des applications possibles dans les domaines de la santé (humaine, animale, végétale) et de l'environnement (impact écologique du développement, mais aussi compréhension des écosystèmes et des interactions entre espèces). Seules les approches multidisciplinaires, ou transdisciplinaires, permettent d'aborder ces questions en profondeur. Les compétences de ses membres couvrent ainsi un vaste domaine, divers et hétérogène, de la chimie des substances naturelles et la chimie organique de synthèse, à des développements en chimie physique, analytique, biophysique et biologie structurale entre autres. Ce sont le décloisonnement et les différents métissages de tous ces champs disciplinaires qui forgent l'identité de la section, et en font la richesse et l'originalité. Ce positionnement est en contraste avec une formation et une structuration du champ scientifique traditionnellement disciplinaires, qui montrent ici leurs limites tant il devient fondamental dans ces domaines, pour le chimiste, d'être formé aux connaissances et savoir-faire de biologie, et pour le biologiste, d'intégrer les concepts et diverses possibilités de la chimie. Les évolutions des axes de recherches des chercheurs de la section ces dernières années révèlent la nécessité d'intégrer un langage et une culture communs. Cela a en particulier conduit la section à initier une action pour fédérer au niveau national une communauté, d'ailleurs identifiée depuis de nombreuses années dans d'autres pays, autour de la *chemical biology*, ou *chémobologie*, qui intègre différents champs disciplinaires situés à l'interface entre la chimie et le vivant.

Le rapport présenté ci-dessous s'attache à couvrir assez largement l'essentiel de ces domaines, mais n'ambitionne bien entendu aucunement d'en atteindre une description exhaustive. De nouvelles innovations scientifiques viendront nécessairement d'interfaces qui n'ont pas encore été, ou n'ont été que partiellement, explorées.

Statistiques (16 principale)

58 structures opérationnelles de recherche

Dont

– 3 UPR, 35 UMR, 3 FRE

– 3 FR

– 6 GDR

– 1 GDS, 3 UPS, 3 UMS, 1 USR

342 chercheurs (165 CRCN, 15 CRHC, 107 DR2, 49 DR1, 5 DRCE et 1 CDI chercheur), dont 66% hébergés dans un laboratoire dépendant principalement de l'INC, 23% de l'INSB, 4% de la DGDR, 4% de l'INEE, 1% de l'IN2P3, 1% de l'INP et 1% de l'INSIS, et pour une personne de l'INSMI.

I. Thématiques

A. Chémobiologie et chimie médicinale

Les évolutions de la chimie à l'interface avec le vivant voient le développement de plus en plus rapide d'un champ de recherche appelé *chémobologie* (ou *chemical biology*), qui intègre des concepts et des outils de chimie et de biologie, pour aller sonder le vivant et éventuellement en modifier, corriger, moduler certains processus. Elle diffère de la *biologie chimique*, ou *biochimie*, mais en utilise les concepts.

Cette discipline fondamentale, qui s'intéresse à tous les règnes du vivant, aboutit aussi souvent à des applications et au transfert technologique des outils moléculaires ou analytiques développés. Elle conduit ainsi à des développements fondamentaux ou à des applications dans des domaines tels que l'environnement (agrochimie, écologie), et elle contribue de manière forte à des avancées dans le domaine de la santé (médicament, diagnostic), où elle se développe de manière parallèle et en étroite interaction avec la chimie médicinale. Le processus de découverte de substances bioactives (drug discovery) sur lequel la chimie médicinale se construit associe en effet de plus en plus des approches complémentaires de ces deux domaines qui se retrouvent désormais fortement intégrés. Notons également le développement de nouveaux outils thérapeutiques (« new modalités ») pour adresser des cibles biologiques souvent réfractaires aux approches classiques basées sur les petites molécules.

Pour mener un programme efficace de chimie médicinale, il convient de disposer d'une originalité tant en termes de cibles visées qu'au niveau des structures proposées. C'est pourquoi bon nombre de projets associent précocement de multiples compétences. Si les cliniciens et biologistes relient la pertinence de la cible à la pathologie, les biologistes mettent en place les méthodes d'évaluation de produits et les chimistes médicinaux travaillent à la synthèse orientée et guidée par la cible, en mettant en œuvre toutes les stratégies et méthodes de synthèse pour atteindre des bibliothèques de molécules efficaces et sélectives, voire spécifiques. Parallèlement, les chémobiologistes développent des outils permettant d'accélérer le processus de découverte des futurs médicaments. Dès les phases précoces du processus, ils élaborent des stratégies d'étude du vivant qui permettront de caractériser les mécanismes impliqués, de comprendre les modes d'action, et d'identifier et caractériser la ou les cibles cellulaires d'une molécule bioactive découverte par exemple par criblage phénotypique, voire d'en moduler l'activité.

Ainsi, dans les domaines d'application thérapeutique, chémobiologie et chimie médi-

nale agissent de manière complémentaire, non exclusives et surtout décloisonnées pour une meilleure évolution et intégration non seulement entre elles mais aussi avec la biochimie, la biologie structurale ou encore la chimie analytique, vers des avancées majeures dans la compréhension et la manipulation des processus biologiques et pathologiques.

1. Modifier et cibler les molécules du vivant

Acides nucléiques

Les acides nucléiques, ADN et ARN, sont impliqués dans un grand nombre de fonctions cellulaires telles que la transcription, la réplication ou encore le contrôle de l'expression de gènes. L'ADN est le dépositaire de l'information génétique et les domaines de l'épigénétique et de l'épitranscriptomique ont mis en évidence un grand nombre de mécanismes de régulation qui modifient son expression. L'ARN est quant à lui désormais reconnu comme une macromolécule essentielle non seulement dans la transmission de l'information génétique, mais aussi comme possédant un rôle crucial dans le contrôle de la traduction. L'étude de l'ensemble de ces processus biologiques impliquant ADN et ARN nécessite le développement de ligands spécifiques, notamment de synthèse, comme sondes et régulateurs artificiels. Ces ligands peuvent cibler l'ADN et ses structures non canoniques, telles que les G-quadruplexes, mais aussi l'ARN qui présente des structures tridimensionnelles complexes et variées souvent propices à des interactions spécifiques.

Parallèlement, les nucléosides et les oligonucléotides représentent des outils essentiels. D'une part, les applications thérapeutiques des oligonucléotides ont pris un nouvel essor ces dernières années avec la mise sur le marché de nouveaux oligonucléotides antisens ainsi que des petits ARN interférant. Ces deux types d'acides nucléiques sont utilisés comme outils pour corriger l'épissage ou réduire les niveaux d'expressions de protéines en ciblant directe-

ment l'ARN messenger. Notons également le développement spectaculairement rapide de vaccins à ARN messenger, notamment contre le SARS-CoV-2. D'autre part, l'exploitation des propriétés physico-chimiques de l'ADN permet de concevoir des nanomatériaux et nanomachines qui restent cependant à optimiser pour des applications en électronique moléculaire, ou des nanostructures telles que les origamis d'ADN pour des multiples applications en nanoencapsulation et vectorisation. Les aptamères constituent également une classe d'oligonucléotides suscitant un intérêt croissant, notamment dans le domaine des biocapteurs. Les ARN catalytiques trouvent quant à eux toute leur place dans des applications biomédicales.

Les développements analytiques de séquençage, en particulier basés sur des systèmes à haut débit hautement sensibles, permettent la mise au point d'outils diagnostiques performants pour la médecine de précision.

Le chimiste reste au cœur du développement de ces nouveaux outils («new modalités») par la conception et la synthèse des moyens nécessaires au succès de ces nouvelles approches.

Peptides et protéines

Les peptides, considérés eux aussi comme des «new modalités», sont redevenus des molécules centrales dans le processus de découverte de médicaments, occupant un espace moléculaire unique entre les petites molécules et les biopolymères. Si ce regain d'intérêt pour les peptides trouve en partie son origine dans les avantages spécifiques de ces molécules (une diversité moléculaire et structurale élevée, des méthodes de synthèse efficaces, une faible immunogénicité et des propriétés remarquables en termes d'interaction moléculaire), il résulte également de l'émergence de nouvelles cibles biologiques d'intérêt thérapeutiques comme les interactions protéine-protéine ou protéine-acide nucléique dont les larges surfaces d'interaction ne sont pas toujours appropriées pour une

modulation par des petites molécules. Cette convergence réside également dans l'arrivée à maturité de technologies de pointe permettant d'identifier des séquences de haute affinité et sélectives pour des cibles réputées difficiles comme les surfaces de protéines. On citera notamment les techniques de sélection *in vitro* comme le «phage display» ou le «mRNA display» qui se sont imposées ces dernières années. Toutefois, les peptides d'intérêt, qu'ils soient d'origine endogène (ex. hormones) ou identifiés par des outils de sélection *in vitro*, ont généralement besoin d'être optimisés avant de pouvoir être considérés comme des candidats médicaments en raison de limitations intrinsèques (demi-vie faible dans les fluides biologiques et faible perméabilité membranaire). Des approches originales souvent couplées à des développements inédits en synthèse organique sont proposées pour relever ces défis (remplacement par des résidus non protéinogéniques, macrocyclisation, modification du squelette peptidique, introduction de mimes structuraux (foldamères), lipidation, bioconjugaison...). Les stratégies visant à contraindre la conformation des peptides se sont révélées payantes. Certaines de ces modulations chimiques peuvent être aujourd'hui couplées avec les méthodes de sélection *in vitro* mentionnées ci-dessus grâce notamment aux avancées remarquables réalisées dans la synthèse ribosomale de peptides non standards ces dernières années. Il ne faut pas non plus négliger les approches d'optimisation basées sur la structure qui bénéficient des progrès des outils de prédiction et de l'accélération de la résolution des structures de biomacromolécules. Ces avancées, couplées à la flexibilité des méthodes de synthèse et de conjugaison bioorthogonales, rendent les peptides particulièrement adaptés à la préparation de sondes efficaces pour étudier les phénomènes biologiques et les interactions moléculaires *in cellula*. Les améliorations régulières apportées aux méthodes de ligation chimiosélectives de fragments peptidiques facilitent l'accès par la synthèse ou l'hémisynthèse à des protéines naturelles ou modifiées et ouvrent des perspectives intéressantes. A titre d'exemple, les protéines de synthèse contenant des modifications

post-traductionnelles (méthylation, glycosylation, phosphorylation ou ubiquitinylation) sont des outils innovants pour des études mécanistiques, biostructurales, ou pour des applications de criblage pour la découverte de nouveaux ligands. En lien avec la biologie de synthèse dans sa définition la plus large et dans le contexte d'approches bottom-up, les peptides suscitent également un vif intérêt comme unités de construction élémentaires pour l'assemblage supramoléculaire de nouvelles architectures ordonnées à l'échelle nanométrique, éventuellement douées de fonctions pour des applications variées (encapsulation et libération, détection, catalyse).

Glucides

Glucides et glycoconjugués sont eux aussi impliqués dans de nombreux processus biologiques, notamment de reconnaissance ou de communication cellulaire, et leur étude contribue à la fois à des avancées d'ordre fondamental, mais également à de possibles applications (santé humaine, science des matériaux, agrochimie, environnement). Les glycosciences sont un domaine en fort développement, auquel la chimie contribue par des développements essentiels tels que l'apparition de nouvelles méthodes de glycosylation basées sur de nouvelles réactivités moléculaires, ou la caractérisation par différentes méthodes spectroscopiques d'intermédiaires réactionnels clés. La synthèse totale d'oligosaccharides est également un champ d'intérêt, qui continue à voir le développement de synthèses automatisées ou de nouvelles méthodes notamment dans le domaine de la protection efficace de monosaccharides ou d'oligosaccharides. L'utilisation de la biomasse ou de déchets industriels comme matière première ainsi que l'exploitation, en plus des approches classiques de synthèse organique, de réactions enzymatiques ou de bioconversions directes par des microorganismes, sont toujours d'actualité pour faciliter l'accès à certains motifs ou précurseurs dérivés de sucres à haute valeur ajoutée. La modification ciblée de cette matière première permet

également le développement de nouveaux matériaux biodégradables, ou durables.

L'analyse structurale et les études sur la biosynthèse des glycanes des parois cellulaires (bactéries, champignons, plantes) sont à l'origine de développements essentiels et, dans ce contexte, la spectrométrie de masse a fait des progrès considérables. Combinées à des outils enzymatiques (CAZymes) actifs sur les glycanes/glycosides, les méthodes analytiques rendent désormais envisageable le séquençage des oligosaccharides. Par ailleurs, les outils de marquage métabolique de glycanes trouvent de nouvelles applications en biologie animale, végétale, et en microbiologie.

L'intérêt pour la stratégie multivalente et le développement de glycopuces ne se dément pas. Cette approche a conduit à des résultats biologiques remarquables et on commence désormais à mieux appréhender les mécanismes impliqués à l'échelle de l'atome. Ces nouvelles connaissances sur la reconnaissance et la signalisation portées par les glucides/glycoconjugués ouvrent aujourd'hui le champ au développement de bio-marqueurs à base de sucres ainsi que de nouvelles approches thérapeutiques (vaccins, stratégies anti-cancer, traitement des diabètes, etc).

Le domaine de la glycomique, qui regroupe l'étude de tous les glucides, glycanes glycoprotéines et glycolipides associés à un processus biologique, nécessite le développement d'outils analytiques miniaturisés, ainsi que la disponibilité d'oligosaccharides « standards » permettant l'identification des composants les plus rares. Dans ce contexte de nouvelles stratégies sont développées pour accéder à des glycoprotéines ou glycopeptides synthétiques parfaitement définis, des mimes d'oligo- ou polysaccharides, ou des outils chémoglycobiologiques.

Lipides

Les lipides constituent une des classes moléculaires essentielles à la vie du fait de leurs implications dans la structure des mem-

branes (fluidité, interactions avec les protéines membranaires), leur rôle de stockage de l'énergie et de messagers cellulaires. Définis comme l'ensemble des métabolites cellulaires solubles dans les solvants organiques mais insolubles dans l'eau, les lipides sont classés en 8 catégories et représentent plus de 40 000 molécules uniques. La perturbation de la composition lipidique cellulaire peut être liée de manière directe (maladie du métabolisme) ou indirecte (maladies neurodégénératives ou cancers, par exemple) à des pathologies humaines ou animales, ce qui conduit à un regain d'intérêt significatif. La synthèse de lipides endogènes ou de leurs métabolites, pour une identification des cibles protéiques et d'analogues pour des approches thérapeutiques, leur identification et leur quantification aux niveaux tissulaire, cellulaire et sub-cellulaire, et l'étude des interactions avec leur environnement membranaire sont autant de domaines d'actualité dans ce contexte. Dans ces domaines, les développements récents d'outils de chimie analytique (spectrométrie de masse, spectroscopies RMN, Raman et associées...), de chémobiologie (chimie bioorthogonale, sondes fluorescentes...) et de chémoinformatique (réseaux moléculaires) permettront d'atteindre ces objectifs ambitieux.

Métabolites

Les métabolites sont un ensemble de molécules organiques de bas poids moléculaire, liées au métabolisme, c'est-à-dire à l'ensemble des réactions chimiques qui permettent à un être vivant de se maintenir en vie, se développer, se reproduire et interagir avec son environnement. Les métabolites primaires sont directement engagés dans les processus vitaux d'un organisme ou d'une cellule alors que les métabolites secondaires sont impliqués dans des processus plus spécialisés qui permettent, en particulier, une meilleure adaptation à l'environnement. La variété des classes moléculaires impliquées, allant de molécules polaires et ionisables jusqu'aux lipides neutres, et l'étendue des gammes de concentration, sur plusieurs décades (du nM au mM), font que

l'étude du métabolome, (la métabolomique), qui s'avère une science en plein essor, fait face à des défis majeurs en termes de détection, d'identification structurale et de cibles. Alors que le métabolisme primaire est particulièrement bien décrit dans la littérature, la biosynthèse et le rôle de nombreux métabolites secondaires ou spécialisés restent encore à explorer, conduisant à un domaine particulièrement dynamique. La métabolisation d'espèces exogènes (xénobiotique), notamment par l'homme, est également un domaine de recherche très actif, à l'intersection entre la pharmacologie et la toxicologie.

2. Explorer le vivant

Sondes moléculaires, sondes pour l'imagerie

Les sondes, notamment les sondes pour l'imagerie, permettent d'explorer le vivant. Ces dernières années, l'imagerie moléculaire, qui cherche à visualiser des événements au niveau cellulaire, a pris son essor, permettant d'envisager le développement d'une médecine plus personnalisée et surtout plus précoce, puisque ces changements moléculaires apparaissent bien avant les changements physiologiques qu'ils engendrent. Les sondes ciblées et « intelligentes » (répondant à un facteur physico-chimique ou un stimulus donné) sont devenues un domaine de recherche majeur. Afin de caractériser, ou imager simultanément plusieurs événements, l'association de différentes techniques d'imagerie et donc le développement de sondes multimodales, devient également un enjeu important.

Parmi les différentes techniques d'imagerie, on peut citer l'imagerie optique, qui se distingue par sa grande précision spatiale et temporelle, mais est limitée par sa faible pénétration tissulaire. Cette technique se développe actuellement suivant plusieurs axes principaux : les approches basées sur les fluorophores proche-infrarouge qui ouvrent vers des fluorophores et pro-fluorophores utilisables en imagerie optique *in vivo* ; les stratégies innovantes d'uti-

lisation de fluorophores auto-assemblés, ou d'amplification du signal ; le développement de nouveaux fluorophores sensibles à l'environnement plus efficaces et les nanoparticules hyperfluorescentes, qui ont permis de diminuer les limites de détection en améliorant le rapport signal/bruit, voire en s'affranchissant du signal non spécifique. Les récents développements de sondes chémiluminescentes avec de bons rendements quantiques dans l'eau autorisent des stratégies ne nécessitant pas d'excitation lumineuse. Les progrès instrumentaux permettent également le développement de microscopies de fluorescence à molécule unique et de la fluorescence ultra résolutive. Enfin, la découverte de nouvelles stratégies de bioconjugaison chimiosélectives ou bioorthogonales, y compris de ligations pro-fluorescentes, associée aux techniques d'incorporation métabolique ou génétique de sucres ou d'acides aminés non naturels, a permis le développement de sondes biologiques plus sélectives et efficaces.

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) est également une technique de choix du fait de sa très grande résolution et de la possibilité d'imager le corps dans son intégralité. Les complexes de Gd restent les sondes principales pour l'imagerie T1, largement déclinées pour permettre l'imagerie moléculaire intelligente. Les complexes de Mn sont également en plein essor du fait du caractère endogène du Mn, avec en particulier la recherche de sondes de plus en plus efficaces, combinant une bonne stabilité thermodynamique avec une inertie cinétique. Bien que produisant un contraste négatif moins lisible, les nanoparticules paramagnétiques sont utilisées pour de l'imagerie T2, et il a récemment été montré qu'il était possible d'obtenir des nanoparticules produisant un contraste positif. L'imagerie CEST (transfert de saturation par échange chimique) a également montré son importance, avec des petites molécules endogènes présentant des protons échangeables, ou des complexes paramagnétiques présentant l'avantage de se situer hors de la fenêtre de transfert d'aimantation des tissus. Ces derniers sont également utilisés comme sondes intelligentes notamment pour l'activité enzymatique

ou encore la détermination de la température et du pH, et ont fait leurs preuves *in vivo* pour cette dernière application. Notons aussi les sondes au fluor 19, en plein développement, ainsi que les sondes au xénon polarisé, peu sensibles mais présentant l'intérêt de ne pas être perturbées par des signaux endogènes.

Le principal défi reste le transfert *in vivo*, avec en particulier la double nécessité d'améliorer la sensibilité et de résoudre les problèmes de quantification. Il existe néanmoins de plus en plus de sondes d'imagerie moléculaire utilisables *in vivo*.

Dans le domaine des autres sondes d'imagerie (radioactives, ultrasoniques...), les principaux axes de de recherche s'orientent vers le développement de méthodes chimiques rapides et efficaces pour incorporer l'agent d'imagerie au sein de la sonde, ainsi que pour sa conjugaison à des biomolécules et agents de ciblage.

Le domaine de la théranostique (thérapie couplée au diagnostic) doit permettre à terme de suivre l'efficacité d'un traitement. Les sondes utilisées sont des sondes moléculaires ou des nanoparticules, permettant de combiner au sein d'un même objet différentes techniques d'imagerie, ainsi que des molécules à activité thérapeutique.

Bioconjugaison et Chimie *in vivo*

Afin de pouvoir étudier les propriétés des biomolécules dans leur environnement, améliorer la biodistribution et l'activité des (bio)-médicaments ou décrypter les différents phénomènes biologiques *in vitro*, voire *in vivo*, les chimistes s'attachent à développer de nouveaux outils innovants permettant de créer, ou rompre, une liaison covalente entre une biomolécule (ADN, ARN, protéine, ose, lipide, métabolite), et une autre biomolécule ou une entité synthétique (vecteur, linker, sonde, traceur, surface...) de façon chimio- et régiosélective, voire bio-orthogonale (réaction s'effectuant spécifiquement en présence de l'ensemble des fonctions chimiques suscep-

tibles d'être présentes dans un milieu biologique complexe), sans altérer les fonctions de la biomolécule ou de l'entité synthétique. Ceci implique de travailler en milieu aqueux, dans des conditions de pH et de température imposées par la stabilité de ces biomolécules, mais aussi à de faibles concentrations, nécessitant des réactions possédant des cinétiques adaptées.

Les développements récents dans les domaines des biothérapeutiques, des technologies miniaturisées de bioanalyse, des techniques d'imagerie, et l'émergence des applications théranostiques ont mis en évidence des limites dans les systèmes de bioconjugaison existants. Une activité importante est actuellement déployée par les chimistes pour inventer de nouvelles réactions ou de nouvelles associations de réactions conduisant à :

- la formation de liaisons stables en conditions physiologiques,

- des liaisons pouvant être rompues spécifiquement suite à un stimulus interne ou externe pour libérer la biomolécule et moduler (voire masquer et dévoiler à loisir) son activité (principe des réactifs cagés),

- des conditions de marquages plus spécifiques, plus efficaces (accélération des cinétiques et des spécificités des réactions de bioconjugaison) et plus flexibles.

D'autres efforts se concentrent sur la mise en place de stratégies permettant d'accéder à des bioconjugaisons multiples ou successives *via* l'élaboration d'un arsenal de réactions bio-orthogonales complémentaires, et au développement de réactions de bioconjugaison enzymo-contrôlées ou photoinduites, d'agents de bioconjugaison multiples associés, voire de réactions successives mutuellement orthogonales. On peut citer aussi les exemples récents de réactions de bioconjugaison ou le développement de réactifs de réticulation (cross-link) fluorogéniques pour la protéomique.

L'intérêt pour la bioconjugaison va certainement s'amplifier dans les années à venir. Elle apparaît déjà comme un domaine clé pour l'élaboration de produits tels que les « anti-

body-drug conjugates » (ADC). Commencent à apparaître également les prémices de systèmes de conjugaison radicalement différents permettant par exemple le couplage de séquences spécifiques ou le détournement de voies métaboliques avec des monomères portant des fonctions bio-orthogonales utilisables pour des réactions de bioconjugaisons spécifiques et ciblées en milieu vivant (incorporation d'acides aminés non naturels dans les protéines, de nucléotides ou nucléosides non naturels compatibles avec les polymérases, de sucres voire de lipides modifiés incorporables dans des biomolécules naturelles).

De façon plus générale, une extension de cette chimie dite biosélective ou biospécifique, consiste à exploiter les spécificités biologiques pour stimuler une réaction chimique. A titre d'exemple, l'activation ciblée de prodrogues peut être déclenchée par l'acidité tumorale, par le glutathion ou les ROS en milieu hypoxique, ou par des enzymes ou des conditions physiologiques caractéristiques d'un phénomène biologique ciblé.

Dans la mouvance de cette chimie bioorthogonale et biospécifique, la chimie *in vivo* est un axe de recherche qui connaît depuis quelques années un essor considérable. Elle porte sur l'utilisation de réactions, de réactifs et de catalyseurs synthétiques pour l'étude et la manipulation du vivant.

Parmi les réalisations emblématiques pour lesquelles ce type de chimie a été le moteur vers une rupture conceptuelle, on peut citer le marquage métabolique, l'« activity-based protein profiling » (ABPP) *in vivo*, l'identification de cibles, ou encore le relargage chimio-induit de molécules thérapeutiques (systèmes programmés) ou diagnostiques associées à la thérapie (théranostique) et le pré-ciblage. La chimie *in vivo* en est à ses balbutiements et les perspectives de développement de nouvelles technologies dans le domaine biomédical qu'elle laisse entrevoir suscitent un vif intérêt des sociétés pharmaceutiques. L'exemple des inhibiteurs covalents est emblématique de cette discipline et connaît un regain d'intérêt aujourd'hui.

Le développement de cette discipline reposera sur la formation de chimistes capables à la fois de maîtriser le domaine de la réactivité chimique et de comprendre les contraintes mais aussi les opportunités liées aux milieux biologiques complexes. Elle est indéniablement l'un des moteurs du renouveau de la chimie moléculaire, et son développement représente pour les chimistes et pour les entreprises du domaine pharmaceutique ou cosmétique, un atout précieux dans le cadre de la compétition internationale. Cependant la nécessaire prise en compte des contraintes biologiques lors de la conception et de l'optimisation des réactions chimiques à impliquer, ainsi que de l'accès synthétique aux sondes afférentes, requiert idéalement une intégration parfaite des activités de chimie et de biologie au sein d'équipes réellement multidisciplinaires et requiert l'utilisation d'un large éventail de technologies en chimie, biologie, imagerie et analyse, voire physique et biophysique.

On peut remarquer que si la recherche française est relativement active sur les aspects de ligation chimique et de chimie bioorthogonale qui ne nécessitent pas une telle intégration, il y a symptomatiquement peu de réalisations dans le domaine de la chimie *in vivo*.

3. Soigner le vivant

Chimie thérapeutique

La Chimie médicinale (ou thérapeutique) est le domaine dans lequel s'inscrit la découverte des molécules biologiquement actives. C'est d'ailleurs dans ce champ vaste de conception d'actifs que les chimistes proposent des solutions à la demande de la médecine personnalisée ou de précision (thérapie ciblée, immunothérapies...). Ils interviennent à de nombreux stades de la découverte de molécules actives.

L'identification et la validation de la cible font maintenant partie des étapes primordiales de la recherche de substance active. Le chimiste, que ce soit par des études de chémobiologie, de biologie structurale, d'analyses

« omics » ou de biophysique, participe activement à cette validation.

Les petites molécules de synthèse, notamment les composés hétérocycliques, restent les produits les plus prisés dans une démarche d'optimisation de composés actifs (modulateurs orthostériques, allostériques, covalents) pour atteindre l'efficacité et la sélectivité nécessaires pour envisager un développement comme agent thérapeutique.

Les premières séries chimiques et la découverte de molécules capables d'interagir avec une cible peuvent être issues de l'intuition ou de la sérendipité mais aussi plus rationnellement de criblage de bibliothèques, de sélection par criblages *in silico* ou de données structurales de ligands endogènes avec la cible (RMN, RX...). Des développements importants autour de la notion d'espace chimique ainsi que de nouvelles approches comme la synthèse par fragments contribuent à améliorer le taux de succès de la découverte de molécules affines. Une fois les premières molécules affines, agonistes ou antagonistes, identifiées, démarrent alors les programmes d'optimisation structurale qui passent forcément par l'exploration de l'espace chimique en relation avec la cible, et la mise en place de méthodes de caractérisation de l'interaction molécule/cible et des effets cellulaires produits. Cette phase peut elle aussi être guidée par des données structurales, des modèles virtuels *in silico* de docking, mais aussi, lorsque ces données sont absentes, menée de façon empirique.

Les produits ayant prouvé leur efficacité lors d'études précliniques, doivent répondre *in vitro* à des critères de stabilité, d'efficacité, de sélectivité, et d'activité cellulaire. Il doivent également être validés *in vivo* (efficacité, biodisponibilité...), sans pour autant induire de toxicité trop importante. Le chimiste médicinal participera à l'optimisation de l'ensemble de ces paramètres via la modulation des structures chimiques, en forte interaction avec la biologie structurale, la pharmacologie, et la biologie entre autres.

La chimie médicinale joue ainsi un rôle fondamental dans les développements cliniques futurs, notamment dans la recherche de nou-

veaux antimicrobiens, dans le développement de thérapies anticancéreuses ainsi que dans la découverte de thérapies innovantes contre les maladies rares ou encore les maladies neurodégénératives. Par ailleurs, de nouvelles approches émergent, telles que la dégradation ciblée des protéines (PROTAC) et l'utilisation d'outils thérapeutiques de haut poids moléculaire, tels que les thérapies à base d'ARN, de peptides ou d'autres substances naturelles. L'utilisation d'anticorps conjugués à des médicaments (ADC) représente aussi une stratégie prometteuse. L'ensemble de ces approches originales et toujours en cours de développement ouvre la voie pour des nouvelles perspectives de recherche et d'application thérapeutique dans lesquelles la chimie thérapeutique peut être pleinement mise à profit. Dans toutes les activités dans le domaine de la chimie médicinale, la chimie de synthèse reste au cœur du processus de découverte de nouveaux médicaments.

Vectorisation et biomatériaux

Un des enjeux majeurs de la chimie médicinale consiste à augmenter la biodisponibilité de la substance active et éviter des effets secondaires toujours à craindre lorsque l'on touche des organes/cellules/compartiments non concernés par la pathologie. La vectorisation consiste à moduler et contrôler cette distribution d'un principe actif en l'associant à un vecteur synthétique ou naturel. Ce type de stratégie est de plus en plus utilisé pour optimiser le ciblage vers un organe ou une cellule, induire la pénétration intracellulaire si la cible est intracellulaire et contrôler la distribution à l'intérieur de la cellule. De surcroît, la vectorisation permet de protéger certaines molécules de la dégradation, vis-à-vis d'une activité chimique ou enzymatique, avant que la cible ne soit atteinte.

Très souvent, ce type de stratégie repose sur la construction de prodrogues ou de systèmes micellaires (liposomes, polymères, nano- ou micro-particules...) susceptibles de favoriser le passage des membranes et de libérer *in vivo* la substance active à l'endroit désiré. L'étape d'activation menant à la libération peut alors jouer

un rôle clé et a donné lieu à des systèmes intelligents, activables par exemple par la lumière, la température, un champ magnétique, le pH, les propriétés redox, une réaction chimique, enzymatique ou non.

Les vecteurs en cours de développement sont de natures diverses, usant d'objets moléculaires de toute taille depuis une petite molécule comme l'acide folique ou le RGD (ligand ciblant les intégrines), jusqu'à des macromolécules comme les anticorps, des assemblages supramoléculaires, des nanoparticules polymériques ou non comme dans la nanomédecine, voire des virus comme par exemple dans la thérapie génique.

Les développements en cours concernent la thérapie, mais également l'imagerie, voire une combinaison des deux dans le cas des agents théranostiques. Par essence, la vectorisation demande la collaboration entre différents scientifiques : chimistes, physiciens, biologistes, galénistes et, enfin, cliniciens.

Dans le domaine médical, les biomatériaux sont de plus en plus utilisés comme agents de substitution d'organes, vasculaires ou osseux, sous forme implantable ou injectable. Leur obtention fait appel à différents types de chimies (métaux, biominéraux, biopolymères, solides hybrides cristallins, hydrogels, etc.). Ils sont conçus pour interagir en surface avec les cellules vivantes, et dans certains cas possèdent des propriétés de libération contrôlée. Construire de tels matériaux ne peut se faire sans comprendre les mécanismes sous-jacents de la réparation tissulaire, ce qui implique d'utiliser des approches intégrées, à l'interface entre la physique, la chimie et la biologie.

Chimiothèques et criblage

Au cours du développement de sondes et de molécules biologiquement actives, le criblage reste une approche essentielle et à haut potentiel dont les applications ne se limitent pas au domaine de la santé. Plusieurs types de criblages existent, tels que ceux basés sur une cible spécifique (essai biochimique, essai

biophysique, essai fonctionnel sur cellules) permettant de découvrir de nouveaux pharmacophores pour cette cible ou encore ceux basés sur un changement phénotypique visant la découverte de cibles pertinentes pour les molécules actives identifiées. Les criblages virtuels ont aussi une place essentielle dans ce contexte et s'avèrent souvent complémentaires des criblages expérimentaux. Les chimiothèques de composés qui entrent dans la stratégie de criblage peuvent être généralistes (posséder une grande diversité moléculaire) ou focalisées vers un espace chimique particulier (ex: fragments, inhibiteurs d'interactions protéine-protéine) voire une famille de cibles (ex: récepteurs aux protéines G, protéines kinases). Le criblage de fragments par méthodes biophysiques est particulièrement bien adapté à l'identification de touches susceptibles d'évoluer en tête de série par assemblage ou croissance progressive. Bien que les molécules hétérocycliques de petit poids moléculaires continuent à jouer un rôle important dans la constitution de chimiothèques, il convient de ne pas oublier des chémotypes alternatifs (« new modalités » : peptides et peptidomimétiques stabilisés, molécules macrocycliques...) permettant d'étendre l'espace chimique criblé.

Notons que le criblage n'est que le début d'un travail multidisciplinaire dans lequel le chimiste médicinal joue un rôle prépondérant. A ce titre, la nouvelle infrastructure de recherche ChemBioFrance permet la conception de projets de criblages intégrés et s'appuyant sur la Chimiothèque Nationale et un réseau de plateformes de criblage, de chémoinformatique et d'études précliniques.

B. Chimie des substances naturelles et des processus biologiques

Le nombre et la diversité des processus biologiques mènent à une très grande variété de substances naturelles. Le chimiste s'intéresse à leur extraction, à leur caractérisation, et à leur

synthèse. Il s'attache également à comprendre, imiter, adapter et/ou créer les voies de biosynthèse associées, afin de les rendre disponibles pour les sciences fondamentales et permettre des applications dans les domaines de la santé, de l'agronomie, etc. Une étroite collaboration entre chimistes, biochimistes, généticiens, informaticiens, modélisateurs et mathématiciens est nécessaire pour décrypter les métadonnées, reconstituer des voies métaboliques théoriques, caractériser la fonction biochimique des nouvelles enzymes ainsi que leurs produits de réaction, caractériser leur structure pour pouvoir les modifier à façon, moduler leur activité ou encore créer *de novo* des voies biosynthétiques. Dans ce contexte, la production de « produits naturels » par imitation ou par modification *via* la combinaison de méthodes biologiques et chimiques nécessite encore des développements, susceptibles de conduire à une valorisation dans de nombreux domaines.

1. Substances Naturelles : synthèse, extraction et caractérisation

Depuis des centaines de millions d'années, les organismes vivants ont su s'adapter à leur environnement en développant un arsenal chimique de défense, d'attaque et de communication de plus en plus riche et complexe. Les métabolites secondaires, ou spécialisés, qui constituent cet arsenal sont une mine inépuisable de diversité structurale et moléculaire dont les cibles spécifiques peuvent être des protéines ou des acides nucléiques, régulant des processus biologiques de l'organisme ou de son environnement. C'est ainsi que les substances naturelles ont été une des sources principales de médicaments depuis l'Antiquité. Cette approche a été un temps délaissée par les industries pharmaceutiques, en partie pour des raisons réglementaires. La mise en place du protocole de Nagoya a régulé mais aussi compliqué l'accès aux ressources naturelles rendant la valorisation de la recherche en produits naturels parfois compliquée d'un point de vue juridique.

Un retour vers les substances naturelles est actuellement opéré, en particulier dans la

recherche de nouveaux antibiotiques. Ce regain d'intérêt est concomitant au développement de nouveaux outils, en particulier pour l'étude des métabolomes des micro-organismes. Le séquençage haut-débit des génomes et des protéomes et leur interprétation/manipulation pour la biosynthèse (*biologie de synthèse*) permet d'augmenter les rendements de production en produits naturels, sources potentielles de matières premières, et d'orienter vers la production de nouveaux métabolites potentiellement actifs par décryptage des voies de biosynthèse. La diversité chimique peut être sondée par des méthodes spectroscopiques (RMN) ou spectrométriques (MS et MS/MS) qui permettent d'acquérir des données structurales en nombre sur des mélanges complexes (données massives ou big data). Les outils chémoinformatiques incluant les approches récentes à base d'apprentissage (« machine learning »), permettent de retraiter efficacement ces grands jeux de données et mettre à jour de nouvelles structures portant potentiellement des activités biologiques encore non décrites. L'ensemble de ces outils permet d'enrichir les banques de molécules gérées au niveau national (chimiothèque et extractothèque).

2. Biocatalyse, biologie de synthèse, bioingénierie

L'enzymologie a évolué avec le temps vers la *biocatalyse*, qui consiste à utiliser des catalyseurs d'origine biologique, tels que les enzymes, pour permettre la transformation de composés naturels ou de précurseurs non-naturels synthétisés chimiquement (*mutasynthèse*). La biocatalyse est réalisée dans des conditions douces (pH neutre, température ambiante, pression atmosphérique, milieux aqueux), et les enzymes se caractérisent par une extraordinaire sélectivité, souvent associée à une énantiométrie et une régiosélectivité significatives. La biocatalyse, qui est une discipline fondamentale encore trop peu représentée en France, a permis, en association avec la biologie moléculaire, le développement de nouvelles biotechnologies destinées à produire/transformer des molécules d'intérêt dans de nombreux domaines (pharmacie, cosmé-

tique, agrochimie, nutrition...) en utilisant des systèmes biologiques divers (enzymes isolées ou cellules entières). Par exemple, l'étude d'organismes et de leurs enzymes permet d'accéder à des éléments structuraux qui en association avec le développement d'approches *in silico* (modélisation moléculaire, bioinformatique) contribuent à orienter la modification raisonnée d'enzymes afin d'améliorer les réactions biocatalysées (voir plus bas, *chimie biomimétique*). Par ailleurs, l'approche génomique et métagénomique puise dans la biodiversité des microorganismes. Associée à la performance des tests de criblage à haut débit automatisables, elle permet un accès à de nombreuses activités enzymatiques, parfois insoupçonnées, que l'on peut utiliser en chimie verte (comme par exemple certaines Bayer-Villiger-monooxygénases (BVMO) avec des sélectivités jusqu'alors inconnues, ou la découverte de nouvelles enzymes comme l'amine déshydrogénase de *Petrotoga mobilis*)⁽¹⁾. La *biologie de synthèse*, domaine en pleine expansion depuis quelques années, permet de concevoir/construire et donc créer *de novo* de nouvelles voies biosynthétiques. Il est ainsi possible de bio-synthétiser des molécules d'intérêt, comme par exemple H₂ chez *Rhodobacter capsulatus* ou des pigments chez *Escherichia coli*, par une approche de bio-ingénierie, en clonant les gènes de plusieurs enzymes dans un même organisme-hôte et/ou en modifiant et réorientant les voies métaboliques naturelles (reprogrammation). Les réalisations sont déjà nombreuses (dihydrocortisone, artémisinine, détecteur d'arsenic, synthèse de caoutchouc, isobutène, synthèse de biocarburants...) et les applications de demain importantes dans les domaines de la santé (médicaments, thérapies...), de l'énergie (production de butanol, éthanol, H₂...), des matériaux (polycaprolactone, soie, plastiques...) et de l'environnement (biocapteurs de métaux toxiques, piègeurs de CO₂).

3. Chimie biomimétique

Le biomimétisme cherche à utiliser les résultats de l'évolution en s'inspirant des systèmes naturels déjà existants. Témoin des pro-

grès dans ce domaine, le prix Nobel de Chimie a récompensé en 2018 les chercheurs Frances Arnold, George Smith et Gregory Winter pour être parvenus à prendre le contrôle de l'évolution par le biais de mutations génétiques et de sélection naturelle. En chimie, le biomimétisme se manifeste à différents niveaux. Il intègre le développement de nouvelles méthodologies de synthèse conçues pour imiter celles à l'œuvre dans le vivant (synthèse biomimétique ou bioinspirée) mais également la conception de molécules ou matériaux capables de mimer la structure et de manière ultime les propriétés et les fonctions des biomolécules et biomatériaux. Conceptuellement, la création de systèmes biomimétiques peut être envisagée avec comme point de départ différents niveaux de complexité moléculaire et de divergence par rapport à la nature. Une approche descendante («top-down») consiste à travailler avec des organismes vivants et à détourner leurs machineries moléculaires afin de mettre en place de nouvelles fonctions comme par exemple la biosynthèse de dérivés de produits naturels (voir ci-dessus). Par analogie avec le milieu vivant, dans lequel repliement et assemblages hiérarchiques permettent de contrôler la forme et la taille des macromolécules biologiques et *in fine* leurs fonctions, une seconde approche, que l'on peut qualifier d'ascendante (bottom-up) cherchera à utiliser des unités moléculaires élémentaires, naturelles (peptides, acides nucléiques) ou non (oligomères synthétiques biotiques ou abiotiques, par exemple) pour concevoir *de novo* des architectures synthétiques originales combinant judicieusement repliement et assemblages. Ces architectures contrôlées aux propriétés émergentes peuvent trouver des applications en reconnaissance moléculaire, comme nouveaux matériaux, comme systèmes de délivrance de principes actifs ou pour la conception d'enzymes artificielles. Ce dernier champ d'application visant à s'inspirer des sites actifs des enzymes pour réaliser des réactions proches (réelles ou supposées) de ce que réalisent les enzymes dans leur environnement natif demeure un objectif central en chimie biomimétique. Alors que certaines approches visent à reproduire scrupuleusement le site actif comme dans le cas de

la synthèse de complexes métalliques mimant la première et la seconde sphère de coordination, d'autres ciblent des assemblages de molécules qui sont assez éloignés des systèmes naturels d'origine. Par exemple, il est possible de mimer un site actif à base de nickel par un complexe de cobalt. Cette approche de chimie biomimétique est notamment illustrée dans le cadre de la recherche de catalyseurs pour la décomposition de l'eau en dioxygène et dihydrogène, candidat très attractif pour stocker et transporter l'énergie solaire et remplacer les énergies fossiles.

4. Les métaux dans le vivant

En biologie, les métaux constituent un paradoxe : ils sont à la fois toxiques, peu bio-disponibles et en même temps indispensables à la vie. En effet, certains métaux sont vitaux pour la cellule parce qu'ils sont impliqués dans des processus cellulaires clés tels que la respiration ou la synthèse de l'ADN. Le vivant a ainsi mis en place des stratégies pour importer les métaux, les transporter et les distribuer de façon très contrôlée dans chaque compartiment cellulaire. L'équilibre cellulaire (homéostasie) des cations métalliques est maintenu par des protéines (métalloprotéines) et des petites (bio)molécules (chélateurs). Chez l'homme, le dysfonctionnement dans l'homéostasie des métaux est à l'origine de pathologies telles que les maladies neurodégénératives, certains cancers, le diabète. Comprendre le rôle des métaux (structure et réactivité) dans les mécanismes du vivant constitue un axe important de la chimie bio-inorganique. Un accent particulier est actuellement porté sur l'élucidation à l'échelle moléculaire des mécanismes mis en jeu dans la biosynthèse de métallocofacteurs, l'assemblage de complexes contenant des métalloprotéines/métalloenzymes, les métallo-régulateurs, la biosynthèse de produits naturels, la modification post-traductionnelle de macromolécules, la production d'ammoniac et d'hydrogène, la réduction du CO₂, l'oxydation de l'eau ou la réduction des protons en dihydrogène, la décomposition de la biomasse cellulosique ou la dégradation des plastiques.

La conception/élaboration de métalloenzymes artificielles (systèmes artificiels, hybrides entre un complexe métallique et une biomolécule) capables de reproduire des réactions catalytiques rencontrées en biologie permet d'aider à la compréhension des mécanismes moléculaires de ces systèmes et parfois d'en améliorer les processus. L'approche permet aussi de développer des réactions abiotiques qui suivent les principes de l'enzymologie, participant ainsi à la biologie de synthèse. Les métaux peuvent également être utilisés pour comprendre le vivant. Ils sont très présents dans les sondes pour l'imagerie (complexes métalliques ou nanoparticules), que ce soit en imagerie nucléaire, optique (NIR par exemple) ou en IRM. La vaste majorité des métaux utilisés pour ces sondes sont des métaux exogènes (Ln, Ru, In, Os, Tc...), même si certains métaux endogènes (Fe, Mn) sont utilisés. Le développement de sondes « intelligentes » et ciblées est en plein essor. On peut citer en particulier les sondes pour la détection des métaux endogènes (Ca, Zn, Cu en particulier) *in vivo*. Enfin, les métaux peuvent être utilisés en thérapie et depuis peu dans le domaine de la théranostique. Il découle de toutes ces études des avancées importantes dans le domaine de la santé/médecine (antibiotiques, nouvelles thérapies, sondes d'imagerie spécifiques aux métaux endogènes), de la chimie durable (développement de systèmes bio-inspirés pour la catalyse) mais également de l'énergie (production de biofuels).

C. Chimie analytique et biologie structurale

Les révolutions technologiques récentes continuent à transformer les méthodes de chimie analytique et de biologie structurale, permettant l'analyse plus précise et plus fiable de la structure, de la dynamique et de la variabilité de systèmes macromoléculaires toujours plus complexes. Ainsi la détection des signaux permet en cryo-microscopie électronique (cryo-EM) d'atteindre des résolutions proches de celles de la

diffraction des rayons X ; les rayons X diffusés se détectent sans bruit de fond ; les méthodes de fragmentation en spectrométrie de masse se diversifient ; l'augmentation des vitesses de rotation des échantillons conduisent à des résolutions, en RMN du solide, proches de celles de la RMN du liquide ; le développement des méthodes d'hyperpolarisation permet d'entrevoir la possibilité de travailler avec des biomolécules sans marquage isotopique ou en très faible quantité. Aujourd'hui, le défi à relever dans l'analyse chimique et structurale des biomolécules est de les positionner dans le contexte de leurs fonctions biologiques, dans l'espace et dans le temps. Pour ce faire, des méthodes de détection et d'analyse doivent permettre d'exploiter des quantités de plus en plus faibles, mais aussi d'intégrer la dynamique et l'évolution des macromolécules et leurs interactions dans l'espace. L'émergence de nouvelles techniques pour mesurer les interactions moléculaires d'un point de vue thermodynamique et/ou cinétique, comme la thermophorèse à micro-échelle ou la fluorescence sur molécule unique (smFRET) va conduire les chimistes à développer des sondes et marqueurs sensibles et stables, afin de caractériser, tracer et marquer les biomolécules dans leur contexte biologique, tout en respectant des contraintes écologiques et de non-toxicité.

La France a la chance de posséder des infrastructures de premier plan au niveau international en biologie structurale, telles que l'IR-RMN porté par l'Institut de Chimie du CNRS, le « European Synchrotron Radiation Facility » (ESRF) à Grenoble et le TGIR SOLEIL à St Aubin sur le plateau de Saclay. Ces deux derniers instruments se préparent à la nouvelle génération de synchrotrons, ouvrant la possibilité de développer des méthodes analytiques avec des faisceaux de plus en plus stables, focalisés et puissants, qui permettront d'aborder des problématiques résolues dans le temps, en particulier en biologie structurale (cristallographie en série ; micro-fluidiques ; SAXS). En parallèle, avec le renforcement des équipements de pointe en RMN (1.2GHz), en cryo-EM et en spectroscopies (fluorescence, RPE, etc.), ces développements permettront de renforcer la compréhension moléculaire de la dynamique des processus biologiques.

1. Spectroscopies de résonance

La RMN liquide est reconnue depuis plusieurs décennies comme outil versatile pour caractériser la dynamique des structures biomoléculaires. Cette singularité vis-à-vis des autres techniques tend à s'estomper car les développements récents en diffraction des rayons X ou en cryo-microscopie permettent maintenant d'obtenir des informations structurales précises et résolues en temps pour des protéines globulaires. Cependant, l'étude des protéines intrinsèquement désordonnées (IDP) est pour le moment réservée à la RMN liquide, les autres techniques ne permettant pas d'obtenir des informations à l'échelle atomique sur ce type de molécules hautement flexibles. Elles sont pourtant très importantes en biologie notamment pour la régulation des mécanismes de signalisation cellulaire. L'absence de structure globulaire des IDP renverse donc le paradigme structure/fonction et ouvre un large domaine d'application à la RMN liquide. Les IDP sont également à l'origine de séparation de phase liquide-liquide (LLPS) et stabilisent des gouttelettes de type gel dans l'environnement cellulaire. Ces condensats fournissent une compartimentation spatio-temporelle cruciale pour la régulation de certaines interactions biomoléculaires pouvant impliquer des acides nucléiques. Le développement des techniques RMN (mesures de RDC, diffusion, relaxométrie) associé au progrès en modélisation moléculaire permet de mieux comprendre la thermodynamique de ces assemblages.

De manière plus générale, les développements de RMN liquide récents se sont attachés à sonder quantitativement la dynamique des échanges entre plusieurs états et à caractériser, à résolution atomique, l'existence d'états transitoires pouvant être peuplés à des niveaux aussi bas que 1%. Ces états «excités» jouent un rôle clé dans la reconnaissance macromoléculaire, l'allostérie, la transduction du signal et l'assemblage macromoléculaire, comme par exemple pour le pliage des protéines ou lors des premières étapes de formation des fibres amyloïdes ou les réorganisations structurales d'ARN non-codants. Parmi ces dévelop-

pements, les approches CEST («chemical exchange saturation transfer»), DEST («dark-state exchange saturation transfer»), et les expériences à haute pression occupent une place importante. Les techniques de marquages isotopiques des biomolécules se sont diversifiées, des marquages uniformes ou spécifiques pouvant être obtenus dans des cellules de différents types ou dans des milieux acellulaires. En particulier, l'utilisation de la RMN du fluor permet d'accéder de manière élégante à des informations structurales locales, cet élément pouvant être incorporé de manière sélective dans les séquences protéiques. La qualité de ces échantillons marqués en isotopes stables permet d'étudier les propriétés structurales et dynamique de protéines ou complexes de haut poids moléculaire pouvant aujourd'hui aller jusqu'au MegaDalton.

Le déploiement du parc RMN français à très haut champ participe aux progrès importants réalisés en RMN biomoléculaire. Dans ce sens, l'installation prochaine d'un spectromètre opérant à 1.2 GHz dans la métropole lilloise doit encore renforcer la recherche française dans ce domaine. Une piste originale explorée depuis quelques années concerne les développements de RMN à champs multiples, ces développements instrumentaux et méthodologiques permettant à la fois de garder les propriétés de relaxation magnétiques favorables obtenues à bas champs et la résolution et la sensibilité importantes propres aux champs élevés.

Le domaine de la RMN du solide a été marqué par des progrès instrumentaux majeurs ces dernières années. Le développement des sondes MAS (Magic Angle Spinning) à rotation ultra rapide permet en effet de limiter considérablement l'effet des interactions anisotropes caractéristiques des solides et de détecter les protons avec une résolution s'approchant de celle obtenue en RMN liquide. L'étude de protéines membranaires, de complexes de haut poids moléculaires et de protéines amyloïdes bénéficie directement de ces avancées. La polarisation nucléaire dynamique (DNP) permet par ailleurs d'améliorer la sensibilité RMN de plusieurs ordres de grandeur. Elle est

appliquée à l'étude des surfaces de matériaux et, pour ce qui concerne les sciences du vivant, elle commence à montrer son potentiel pour la caractérisation de membranes cellulaires intactes. L'hyperpolarisation obtenue à l'état solide peut être aussi utilisée à l'état liquide, en réalisant une dissolution rapide du matériel marqué en isotopes. Cette approche est appliquée à l'étude des interactions biomoléculaires ou aux suivis métaboliques en temps réel.

Les études RMN solides et liquides permettent donc aujourd'hui d'explorer des assemblages et processus biologiques complexes. Elles s'appuient sur une palette d'expériences et de méthodologies très versatiles, un grand nombre de possibilités pour le marquage isotopique des échantillons et sont soutenues par des progrès instrumentaux importants. La RMN se montre particulièrement performante pour les études de dynamiques des protéines et pour caractériser les états faiblement peuplés, en échange avec des conformations plus abondantes mais qui sont parfois moins pertinentes d'un point de vue biologique. Les informations obtenues au sein de complexes ou d'assemblages supramoléculaires peuvent alors être combinées avec d'autres approches (diffusion et diffraction des rayons X, des neutrons, cryo-microscopie, fluorescence, RPE...) pour construire des modèles tenant compte des conditions physiologiques. Des premiers résultats d'études RMN et RPE en milieu cellulaire sont apparus et seront amenés à se développer dans les prochaines années.

2. Spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse (MS) est une technique d'analyse spécifique et sensible pour les biomolécules, couvrant une palette allant des petites molécules aux macromolécules et assemblages supramoléculaires de natures variées (*i.e.* métabolites, lipides, glycoconjugués, peptides, protéines). Au cours des dernières années, le couplage de la MS à différentes techniques séparatives, comme l'électrophorèse capillaire, la chromatographie

d'exclusion stérique, la chromatographie supercritique, ou encore la nano-chromatographie en phase inverse, a fortement progressé pour permettre l'analyse de mélanges de plus en plus complexes, ainsi que de quantités de plus en plus faibles de matériel biologique ou issu de milieux naturels, pour des applications dans différents domaines (chimie de synthèse, biologie, santé, environnement, écologie). De plus, ces technologies évoluent très rapidement (vitesse d'acquisition, sensibilité et résolution), ouvrant ainsi régulièrement la voie vers de nouvelles perspectives d'analyses. En particulier, le développement de nouveaux modes de fragmentations par activation UV ou interaction par des faisceaux d'électrons permet d'obtenir des informations structurales complémentaires à la technique classique de dissociation induite par collision qui reste incontournable en première approche.

L'analyse de complexes protéiques et d'assemblages macromoléculaires, l'étude de leurs conformations et de leurs interactions, et la caractérisation de leurs modifications post-traductionnelles représentent toujours un réel enjeu en biologie. La MS structurale a énormément progressé ces dernières années et devient de plus en plus une approche complémentaire majeure d'autres techniques en biologie structurale et intégrative pour l'analyse d'objets de plus en plus grands et hétérogènes. La MS native, la MS top-down, la mobilité ionique, l'échange Hydrogène-Deutérium et l'utilisation d'agents pontants, constituent un arsenal de techniques pour lesquelles des progrès substantiels ont été réalisés et continueront de contribuer significativement dans ce domaine.

Les approches de spectrométrie de masse localisées, *i.e.* après microdissection, ou directes, par imagerie par spectrométrie de masse (LDI, MALDI, SIMS, DESI...), s'orientent vers la détection de biomolécules à l'échelle cellulaire voire subcellulaire permettant une meilleure connaissance des processus biologiques et tendent, en milieu hospitalier, à devenir des méthodes de diagnostic complémentaires aux approches traditionnelles. Actuellement, l'imagerie par spectrométrie de masse est en plein essor, que ce soit sur le plan de la préparation

d'échantillon lorsqu'elle est nécessaire, ou sur le plan de l'instrumentation, et les équipes de recherche tendent à s'équiper de plus en plus au niveau national.

Pour l'ensemble de ces approches basées sur la MS, l'analyse des données produites, par des méthodes telles que des approches statistiques poussées pour la recherche de biomarqueurs ou *via* l'outil des réseaux moléculaires pour la dérégulation de mélanges complexes, est devenue un point critique, et l'évolution de ces technologies ne pourra se faire sans un développement d'outils informatiques dédiés.

3. Diffraction, Microscopie, Imagerie

Plus que centaines, les méthodes de diffraction évoluent encore pour permettre de travailler sur de plus petits échantillons (jusqu'à des tailles sub-micrométriques) et avec maintenant une immense gamme de résolution temporelle intéressant la chimie (de la ps à la s). Les travaux sur sources XFEL bientôt sur les sources synchrotron de 4^e génération ouvrent de nouvelles possibilités pour l'étude des réactions enzymatiques ou la modification chimique des macromolécules à l'échelle atomique avec des résolutions temporelles complémentaires (respectivement ps - ms et ms - s). Simultanément, la micro-diffraction électronique prend son essor tant pour la résolution de structures de peptides ou de protéines (plutôt de taille petite ou moyenne) que de petites molécules pour en livrer la structure tridimensionnelle exacte. Ces techniques augmentent les possibilités de criblage de petites molécules directement par cristallographie. Les dispenseurs acoustiques permettent la préparation de ces complexes sans contact et en petits volumes alors que la microfluidique ouvre la voie aux mélanges rapides de (micro)-cristaux avec des solutés juste avant la diffraction et donc à l'enzymologie structurale résolue en temps (voir I.B.2). Pour les plus gros assemblages moléculaires, la cryo-microscopie électronique apporte une révolution en résolution spatiale, donnant accès à des études

à l'échelle atomique d'objets biologiques très complexes (complexe ribosome-antibiotique) et souvent (très) fragiles. Elle révèle aussi des flexibilités importantes dont la modélisation fine implique le développement de nouveaux outils bioinformatiques (voir ci-dessous).

4. Biologie structurale intégrative

Les études tant expérimentales que théoriques (simulation, modélisation) gagnent en vitesse et en qualité tout en augmentant les résolutions spatiales et temporelles accessibles. La combinaison harmonieuse de ces techniques ouvre la voie à une meilleure compréhension du vivant mais implique la manipulation de nombreuses données très hétérogènes allant de la mécanique quantique à la modélisation gros grain des membranes ou la simulation atomique d'un virus coté bioinformatique, et de la fluorescence de molécules uniques, la spectrométrie de masse, les spectroscopies RMN et RPE, la diffraction (X ou électronique) et la cryo-microscopie, côté expérimental.

D'un côté, les structures de très larges assemblages macromoléculaires déterminées permettent de se rapprocher de l'échelle mésoscopique pourvue en images (sub-) cellulaires par la tomographie électronique et les microscopies super-résolutives (20 nm de résolution avec les techniques STED ou SMLM) dont la combinaison serait une ultime microscopie corrélatrice. De l'autre, les réactions chimiques subies ou catalysées par le vivant peuvent être décrites très finement (résolution sub-atomique) notamment grâce à l'augmentation de puissance de calcul. La modélisation simultanée des différentes données expérimentales et théoriques nécessite des pondérations propres (ex. : paradigme bayésien) et fait l'objet de nombreux développements.

Ainsi, une description atomique à de nombreuses échelles de temps des molécules du vivant et de leurs interactions se généralise avec d'importantes perspectives en chimobiologie et chimie thérapeutique (ex. : optimisation plus rationnelle des médicaments).

5. Bioinformatique, chémoinformatique et modélisation moléculaire

La disponibilité d'un volume croissant de données expérimentales (physicochimiques, omiques, pharmacologiques, cliniques) révolutionne le domaine d'applicabilité des méthodes de conception, de synthèse et d'analyse de molécules bioactives, et change significativement les paradigmes utilisés pour prédire des relations structure-propriétés, notamment avec l'utilisation de méthodes d'apprentissage (supervisées ou non) dites « d'intelligence artificielle ». Un effort significatif doit cependant être entrepris afin de concevoir à la fois les jeux de données (apprentissage et test) ainsi que les descripteurs (blocs d'assemblage, réactions chimiques, pharmacophores, fragments, graphes, réseaux) les plus pertinents, qui permettront de développer des modèles robustes. Les réseaux moléculaires en spectrométrie de masse ou la méthode DP4 en dichroïsme circulaire sont aussi en plein essor pour la déréduplication de jeux de données en métabolomique et la détermination de stéréochimie de produits naturels. Dans le domaine de la chémoinformatique, la prédiction de propriétés ADMET (absorption, distribution, métabolisme, excrétion, toxicité) reste un enjeu majeur, dont la précision doit être améliorée au moyen de deux leviers : (i) la disponibilité de données expérimentales homogènes sur un large espace chimique, (ii) l'utilisation de méthodes d'apprentissages profonds. Une collaboration et un partage des ressources plus intenses entre le secteur pharmaceutique privé et le secteur académique seront une condition importante de succès.

6. Les Omiques

La spectrométrie de masse est au cœur de plusieurs approches à large échelle de type « omiques », comme la protéomique et, plus récemment, la métabolomique, la glycomique et la lipidomique. Ces approches ont pour objectif l'identification et la quantification d'un très grand nombre de biomolécules sans *a priori*, ou bien d'un nombre restreint de bio-

molécules d'intérêt de façon ciblée, dans des séries d'échantillons complexes. Elles génèrent ainsi un volume de données très conséquent, qui nécessite des outils informatiques spécifiquement adaptés à l'analyse de ces données.

La protéomique a atteint un certain degré de maturité. Elle continue néanmoins de progresser vers une protéomique fonctionnelle pour répondre à des questions biologiques et cliniques de plus en plus difficiles, comme la dynamique spatiale et temporelle des protéomes cellulaires, l'étude à large échelle des modifications post-traductionnelles des protéines, le dosage de protéines dans des fluides biologiques. Le développement de protocoles expérimentaux sophistiqués basés sur une combinaison d'approches originales de préparation d'échantillons (marquages, méthodes d'enrichissement, méthodes séparatives), d'acquisition des données par MS et de traitement bioinformatique des données (développement d'outils logiciels dédiés) a permis des avancées significatives dans la compréhension de la fonction de protéines et de leurs complexes, de processus cellulaires, ou encore de mécanismes moléculaires en lien avec des pathologies.

De même, le développement de la lipidomique, de la métabolomique et de la glycomique (caractérisation des glycanes et analyse des glycosphingolipides entre autres) permet de voir sous un autre jour des études auparavant uniquement basées sur la génomique et la protéomique et ainsi d'apporter des éléments nouveaux dans la compréhension de mécanismes mis en jeu dans certaines pathologies et de leur évolution au cours du temps. De nouvelles méthodes de traitement d'échantillon (telles que des méthodes de marquage chimique, comme la réaction de Paterno-Büchi pour la lipidomique) et d'analyse, sont mises au point afin de pouvoir caractériser un maximum de lipides dans un minimum d'échantillon. Cependant, contrairement à la protéomique, le traitement informatique en lipidomique et métabolomique reste encore à explorer.

La RMN est très bien positionnée pour les études métabolomiques, étant peu onéreuse et

ne nécessitant pas de préparation élaborée de l'échantillon. Cette technique est en outre reproductible, quantitative et non destructive. Ces différentes caractéristiques permettent de conduire des études en RMN liquide directement sur les fluides biologiques et en RMN solide sur les tissus intacts et les biopsies.

Les développements RMN récents ont surtout visé à simplifier et accélérer les acquisitions de données. Pour cela, l'utilisation de méthodes « pure shift » et « ultrafast », HR-MAS à rotation ultra-rapide, ou d'expériences à deux dimensions génère des spectres mieux résolus et les techniques d'hyperpolarisation ou d'acquisition rapide permettent de réduire considérablement le temps nécessaire à la collecte de données. Ces développements sont soutenus par des progrès technologiques importants, une société commercialisant maintenant des appareils dédiés à ces analyses métabolomiques.

La spécificité de la RMN est également d'avoir accès aux signatures des métabolites à une échelle atomique. La combinaison des données isotopiques et métabolomiques permet ainsi de faire de réels progrès dans la compréhension des métabolismes grâce à l'étude des fractionnements isotopiques. Les empreintes isotopomiques enregistrées en RMN pourraient également constituer un outil diagnostique pertinent.

La communauté française est très bien positionnée au niveau international dans les disciplines « omiques » utilisant la spectrométrie de masse et en RMN métabolomique. Outre le développement d'approches robustes de plus en plus sensibles, précises et efficaces, un enjeu majeur des approches « omiques » réside également dans la maîtrise d'outils informatiques pour une exploitation performante des données engendrées et l'avancée vers l'intégration de données « multi-omiques ». Devant l'évolution rapide des technologies et la pluridisciplinarité des compétences requises, la mutualisation de moyens au travers de l'association de plateformes technologiques performantes à des structures de recherche innovantes joue un rôle clé dans ce domaine.

II. Situation actuelle de la communauté scientifique

A. Forces et faiblesses de la recherche

La communauté scientifique relevant de la Section est relativement bien répartie dans les différents domaines scientifiques évoqués ci-dessus, avec néanmoins une concentration de forces plus marquée dans certaines sous-disciplines d'importance. D'autres, telles que la biochimie, peuvent souffrir d'un manque de visibilité propre, même si celle-ci apparaît comme une discipline essentielle aux développements en biocatalyse, biologie structurale et bio-ingénierie, ou pour la chimie biominétique, la chémobiologie ou la biologie de synthèse.

Le domaine de la chémobiologie souffre encore d'un manque de structuration alors que d'autres pays (Allemagne, Suisse, pays anglo-saxons) ont déjà largement organisé la communauté correspondante. La prise de conscience de cette situation s'est traduite par des opérations telles qu'une action de convergence portée par l'Institut de Chimie du CNRS, ou l'affichage de ce thème par les sociétés savantes. Une meilleure organisation de la communauté est ainsi en cours de construction et devrait se concrétiser avec des nouvelles actions dans un futur proche.

La recherche à l'interface entre chimie et biologie implique de développer des compétences de pointe en chimie (développement de méthodes de synthèse avancées, développements instrumentaux, application de concepts – réactivité, thermodynamique, cinétique, etc.), tout en maîtrisant de plus en plus les outils de la biologie (biochimie, biologie moléculaire et cellulaire, techniques d'imagerie cellulaire, etc.) et de l'informatique et ses développements actuels (don-

nées massives, apprentissage profond, réseaux moléculaires...). C'est bien cette complémentarité et cette diversité des compétences qui fait l'originalité et la force de ce positionnement, mais également la difficulté, en raison des nombreuses connaissances à acquérir et de la nécessité de collaborations multiples au sein de projets d'envergure. Cette situation peut impacter la visibilité individuelle de chercheurs engagés dans ces travaux intrinsèquement collaboratifs, notamment quand cette visibilité est souvent apportée par les aspects applicatifs. Par ailleurs, ces projets d'interface sont souvent longs, nécessitant un important travail avant d'être publiables, et difficiles à financer.

B. Enjeux de l'évolution de la démographie de la communauté scientifique

La communauté scientifique relevant de la section 16 a été maintenue relativement stable et équilibrée ces dernières années, tant en termes d'âge de recrutement et promotion, qu'en termes de répartition entre hommes et femmes, même après les changements majeurs qui ont eu lieu récemment. En effet, la fusion des grades CR2 et CR1 en un seul grade CRCN a conduit à un concours unique. Si ceci n'a pas vraiment impacté l'âge moyen des candidats au concours, on peut noter un léger glissement de l'âge moyen de recrutement (33,8 ans en 2019 contre 32,8 en 2017). La section s'est attachée, lors des recrutements, à garder un bon équilibre entre les différents niveaux d'expérience de recherche ainsi qu'entre les différentes thématiques dont les laboratoires d'accueil ont besoin pour progresser et innover dans les projets de recherche et la gestion de la recherche. Par ailleurs, une auto-évaluation attentive ne fait pas apparaître de biais de genre sensible au cours des recrutements ou des promotions. Ceci se traduit notamment par le maintien d'une population homogène hommes/femmes. Un effort supplémentaire pourra néanmoins être apporté afin d'encourager les candidatures féminines aux promotions ou au recrutement DR2.

III. Organisation et pratiques de la recherche

A. Relations avec le monde socio-économique

Les recherches menées à l'interface entre la chimie et la biologie peuvent assez fréquemment trouver des applications dans des domaines tels que la santé ou l'environnement, et, à cet égard, sont l'occasion de collaborations industrielles. On note cependant un désinvestissement majeur de grandes sociétés du domaine pharmaceutique, qui ont tendance à privilégier des contrats de prestation finalisés plutôt que des programmes de recherche partagés. Cette réorganisation du tissu collaboratif se fait au profit de petites entreprises, ou de valorisations technologiques susceptibles de conduire à des accords de licence ou à des créations d'entreprises innovantes. A ce titre, ces recherches peuvent être soutenues par les différentes structures d'appui à l'innovation, parmi lesquelles les SATT ont désormais pris une place prépondérante. Cette situation peut conduire paradoxalement à un glissement dans les activités de recherche des laboratoires, l'accès aux financements liés à la valorisation devenant plus aisé que ceux des structures de financement de la recherche telles que l'ANR. S'il est important de soutenir les efforts de valorisation technologique, un déséquilibre est en train de s'installer, au détriment d'une recherche plus fondamentale et risque de conduire, à court ou moyen terme, à un essoufflement de l'ensemble du système.

B. Formation et enseignement

La communauté est aussi fortement impliquée dans les enseignements disciplinaires et transdisciplinaires à tous les niveaux de forma-

tion et d'enseignement supérieur participant ainsi de manière importante non seulement à la formation des étudiants par la recherche mais aussi aux activités universitaires dans leur ensemble.

Des formations universitaires à l'interface chimie-biologie sont disponibles à tous les niveaux : BTS, IUT, Licence et Master. Les étudiants qui suivent ces parcours sont formés en chimie organique, en biologie moléculaire, en biochimie, en chimie analytique, à la biologie structurale, en chimie-physique ou en chimie supramoléculaire pour des applications en biologie et en santé humaine. Ces formations demandent un double socle de connaissances et sont donc exigeantes. Les initiatives permettant d'aller au contact des lycéens pour les sensibiliser à l'interface chimie-biologie, ou de les immerger dans les laboratoires de recherche pour des stages de courte durée semblent importantes pour leur donner l'envie d'embrasser des carrières scientifiques et maintenir un flux d'étudiants conséquent pour ces formations. Notons cependant que les réformes actuelles des études secondaires scientifiques, impliquant une spécialisation précoce, risquent de diminuer la culture générale des étudiants en biologie au profit d'une interface mathématiques/physique/chimie jugée plus rentable stratégiquement.

Si les premiers cycles universitaires technologiques sont très appréciés par les entreprises et les étudiants, l'attractivité est plus nuancée au niveau master. L'offre de formation apparaît effectivement très hétérogène en nombre et en qualité en fonction des universités ; elle repose sur des politiques pédagogiques et des moyens alloués qui sont extrêmement variables selon les territoires. De plus, les responsables de formation ont une visibilité sur la pérennité de leur formation qui dépasse rarement une ou deux années. Cela engendre une certaine démotivation quant à la mise en place de projets d'envergure et pousse certains à faire du recyclage de l'existant ou du clientélisme pour réunir le nombre critique d'étudiants pour l'ouverture d'une formation. Ainsi, même si certains diplômes ont été entièrement conçus en fonction d'objectifs pédagogiques définis à

l'interface chimie-biologie (IUT, CMI, spécialisations en école d'ingénieurs...), d'autres formations, moins cohérentes, résultent quant à elles d'un simple assemblage d'ECTS déjà proposés dans les parcours de Licence et de Master mono-disciplinaires (chimie et biologie), et dans de nombreuses universités, il n'y a pas ou peu d'initiatives visant à décloisonner réellement les disciplines (chimie et biologie) au sein d'une même formation de master. En conséquence, les candidats en thèse sont inégalement préparés pour effectuer des travaux de recherche à l'interface chimie-biologie, en particulier d'un point de vue pratique. A cet égard, les formations complémentaires proposées par les écoles doctorales sont précieuses pour compléter les connaissances des étudiants après leur master.

C. Positionnement de la discipline

Les activités relevant de la section s'enrichissent fortement d'un décloisonnement disciplinaire et de l'intégration forte entre les outils, concepts et techniques issus de la chimie et de la biologie. L'acquisition d'un langage commun, autour d'échanges fréquents entre les deux disciplines, et l'élaboration commune de projets, conduisent à des développements originaux qui autrement resteraient difficilement accessibles. Certains laboratoires, certaines équipes, se sont construits sur cette vision et permettent d'envisager une mutation vers une discipline d'interface plus intégrée. De ce point de vue, l'implication commune de l'INC et de l'INSB auprès de la section reste un symbole fort de cette volonté d'intégration inter- ou transdisciplinaire.

Notons que les travaux d'interface entre chimie et biologie conduisent également à des avancées dans les domaines liés à l'environnement (pollution, remédiation, développement durable, énergie, étude des relations entre organismes et des écosystèmes, écologie chimique). A ce titre, il semblerait opportun de

repenser l'interaction entre la section 16 et l'INEE, certaines disciplines, telles que l'étude des substances naturelles, étant largement réparties entre ces deux instituts. La vision du chimiste est indispensable dans ces domaines, et on ne peut penser l'écologie sans la chimie.

Enfin, les développements actuels dans le traitement des données massives (big data) et dans les processus d'apprentissage approfondi et d'intelligence artificielle sont amenés à faire évoluer nos pratiques scientifiques. Cette interface avec la recherche informatique apparaît donc également comme un chantier dont l'importance sera capitale à très brève échéance.

Les relations avec les autres organismes passent notamment par l'interaction avec différents Instituts Thématiques Multi-Organismes d'Aviesan, tels que l'ITMO Bases Moléculaires et Structurales du Vivant, l'ITMO Maladies Infectieuses ou l'ITMO Cancer.

D. Contexte national et valorisation des résultats

Le financement de projets de recherche à l'interface demeure cependant une difficulté, qui semble même s'amplifier sur la période récente. A cela, on peut voir notamment deux causes majeures. Tout d'abord, la régionalisation croissante du financement de la recherche (Financements régionaux, Labex, SATT par exemple), s'avère un frein au développement de projets d'interface, très souvent collaboratifs au-delà des frontières régionales, ou conduisent à une vision déséquilibrée de ces projets (financements favorisant l'interaction avec un interlocuteur local). Par ailleurs, très peu de structures financent des projets d'interface entre chimie et biologie, dont les porteurs seraient des chimistes et non des biologistes. Ceci conduit à un biais majeur, favorisant le financement de projets orientés vers l'application biologique plutôt que de projets plus fondamentaux, de développement de stratégies susceptibles de trouver un impact plus large. Le repliement disciplinaire que l'on a pu obser-

ver ces dernières années, lié aux contraintes budgétaires au niveau de l'ESR, n'a pas favorisé le développement d'équipes multidisciplinaire ou la création de postes académiques ciblés aux interfaces. Alors que l'on observe chez nos principaux concurrents (Europe, Etats-Unis, Japon) un réel effort pour promouvoir une discipline telle que la chémobiologie, cette discipline est très peu identifiée dans le paysage français. Il est à ce titre important de constater que l'ANR ne présente plus de guichet pour ce type de projets, alors que c'était le cas par le passé avec les programmes Physique et Chimie du Vivant (PCV) ou Programme interdisciplinaire de recherches sur les systèmes moléculaires et cellulaires, et d'innovation biomédicale (PIRIBio). Notons dans ce cadre l'initiative heureuse, et qui mériterait d'être amplifiée, de la Fondation pour la Recherche Médicale (FRM) avec son appel Chimie pour la Médecine, dans lequel les projets doivent impérativement être portés par des chimistes. Dans les domaines d'application thérapeutique, les collaborations avec des sociétés ou capitaux privés sont essentielles pour pousser les molécules vers les phases ultérieures de développement dont l'étude de tous les paramètres ADME ou de Toxicité. En raison de la frilosité de l'industrie pharmaceutique dans ce domaine, le secteur s'est restructuré. Il profite désormais des dynamiques des territoires, des structures de type SATT ou encore Instituts Carnot, pour démarcher les sociétés de biotechnologie (biotechs) ou favoriser l'éclosion de jeunes pousses (startups) pour engager les phases précoces de développement.

Notons comme nos prédécesseurs, que le métier de chercheur n'a cessé d'évoluer depuis une quinzaine d'années, avec une part de plus en plus importante de l'activité consacrée à des tâches administratives diverses, au détriment de l'activité première de recherche. Ces tâches sont nombreuses, et conditionnent toute l'activité du chercheur, qui bien souvent passe notamment une grande partie de son temps à la recherche... de financements. Avec les taux de succès actuels, cette recherche de financements s'avère très aléatoire, conduisant à l'accumulation de sentiments de frustration et

de découragement. Des projets importants et prometteurs doivent être abandonnés s'ils ne sont pas financés, ou morcelés sur les temps courts imposés par les organismes de financement. On constate également une détérioration générale des conditions de travail, faute de financement pour entretenir l'instrument de travail et le bâtiment, alors que certaines opérations de prestige contribuent à accroître les disparités entre laboratoires. Et encore, la recherche de financement reste un moyen de réaliser une certaine forme de recherche (travail bibliographique, capitalisation sur des résultats, projection sur plusieurs années). De nombreuses autres tâches administratives éloignent le chercheur de sa recherche, tout en lui imposant des pressions nouvelles.

Les conditions actuelles du recrutement des jeunes chercheurs, dans un contexte de nombre de postes fortement réduit (le nombre de postes au concours CR pour la section 16 est passé de 8 à 4/5 en 6 ans) et de financement de la recherche presque exclusivement sur projets, pourraient tendre à une uniformisation des types de profils recrutés. Les attentes de visibilité individuelle, la nécessité d'apparaître de plus en plus tôt comme porteur de projet, conduisent à un isolement des chercheurs dans leur recherche quotidienne. Cette individualisation des évaluations et des financements conduit à un morcellement des équipes de recherche et à des mises en compétition pas toujours profitables à l'avancement de la recherche, ni à la bonne entente au sein des laboratoires, et en contradiction avec la nécessité de définition de projet et de stratégie scientifique d'unité. De nombreux chercheurs expriment désormais ces malaises par écrit dans leurs documents d'évaluation.

Par ailleurs, les évolutions programmées de la stratégie de publication vers des revues et données « open-source » conduiront, au moins dans un premier temps, à une forte contradiction entre ces ambitions louables de revoir tout l'écosystème de publication et d'accessibilité aux données, et une évaluation par les organismes qui reste largement basée sur le nombre de publications, les facteurs d'impact et la réussite individuelle, système poussant donc à l'in-

dividualisme, par rapport à la nécessité de collaborations et de mutualisations particulièrement fortes dans nos disciplines. A ce titre, les travaux collaboratifs entre chimie et biologie conduisent souvent à rompre l'équilibre entre les deux disciplines simplement par la nécessité de hiérarchiser les co-auteurs de publications.

E. Nouveaux outils pour la recherche

La plupart des projets d'interface chimie-biologie nécessitent la mobilisation d'appareillages et la mise en œuvre d'outils analytiques de plus en plus performants pour l'analyse de systèmes moléculaires de plus en plus complexes. Ces instrumentations multiples, qui apportent chacune des informations spécifiques (RMN, spectrométrie de masse, RPE, synchrotrons, microscopes, etc. mais aussi clusters de calculs et systèmes de stockage de données), sont très coûteuses et nécessitent des jouvences régulières. Si certains appareillages prestigieux, à la pointe de la technologie, sont aujourd'hui accessibles et bien financés au sein d'infrastructures nationales (IR-RMN, FT-ICR, RENARD financés par l'INC, plateformes financées par le ministère de la recherche et les PIA : IBISA / FRISBI / PROFI / ChemBio-France / France BioImaging / Synchrotrons, etc.), il faut noter la difficulté accrue de maintenir et renouveler au sein des laboratoires les équipements analytiques certes moins prestigieux mais indispensables à la recherche quotidienne. Très peu de guichets sont aujourd'hui accessibles pour ces équipements qui restent coûteux, avec des sources de financements très inégales selon les régions, ce qui pourrait conduire rapidement à des déséquilibres inquiétants. Ceci, sans compter la difficulté de mettre en place un modèle économique viable (contrats de maintenance souvent exorbitants) pour faire vivre ces instruments et ces plateformes dans la durée. Une réflexion au niveau national apparaît aujourd'hui indispensable pour pérenniser, à côté d'appareillages

prestigieux nécessaires pour des applications très spécifiques et pouvant être déportées des laboratoires, un réseau d'appareils analytiques de gamme « moyenne », ainsi que les réseaux de techniciens et ingénieurs indispensables au soutien et au développement des projets au quotidien dans les laboratoires de chimie à l'interface avec la biologie.

Conclusion

Dans la continuité des rapports précédents, nous sommes convaincus de l'importance du positionnement thématique de la section pour une interface forte entre chimie et biologie, dans laquelle la chimie doit pouvoir exister en tant que telle. Cela se traduit historiquement, au-delà des liens naturels avec l'INC, par des interactions étroites avec l'INSB et des recrutements dans des laboratoires affiliés à cet institut. On commence également à constater que l'INEE sollicite la section 16 pour identifier

certains profils, et que des recrutements proposés par la section sont affectés dans des laboratoires de l'INEE.

Comme nous l'avons relevé plusieurs fois dans ce rapport, la structuration historique du champ scientifique autour de disciplines individualisées, en ce qui concerne à la fois la recherche, la formation, le financement et l'évaluation, rend difficile dans notre pays le développement de recherches véritablement intégrées, dépassant la notion même d'interface.

Nous l'évoquons en introduction, la section est riche de ses nombreuses communautés, de leurs interactions, de leur complémentarité. Elle veille à maintenir les équilibres entre ces différentes forces, à consolider leur visibilité, tout en accompagnant les évolutions scientifiques et l'émergence de nouvelles avancées et de positionnements originaux. Ceci passe par une bonne articulation avec les autres sections de chimie (INC), mais également des sections relevant des sciences biologiques (INSB), et des sciences de l'écologie et de l'environnement (INEE).

Annexe I

ABPP – Activity-Based Protein Profiling	CEST – Chemical Exchange Saturation Transfer
ADC – Antibody-Drug Conjugate	CMI – Cursus Master en Ingénierie
ADMET – Absorption, Distribution, Métabolisme, Excrétion, Toxicité	DESI - Desorption ElectroSpray Ionization
ADN – Acide DéoxyriboNucléique	DEST - Dark-state Exchange Saturation Transfer
ANR – Agence Nationale de la Recherche	DNP – Dynamic Nuclear Polarization
ARN – Acide RiboNucléique	ECTS - European Credits Transfer System
BTS – Brevet de Technicien Supérieur	ESRF - European Synchrotron Radiation Facility
BVMO – Bayer-Villiger MonoOxygénase	FRET – Förster Resonance Energy Transfer
CAZymes – Carbohydrate-Active Enzymes	

FRM – Fondation pour la Recherche Médicale	RGD – Séquence péptidique Arg-Gly-Asp
HR-MAS – High-Resolution Magic-Angle Spinning	RMN – Résonance Magnétique Nucléaire
IDP – Intrinsically Disordered Protein	ROS – Reactive Oxygen Species
IR-RMN – Infrastructure de Recherche Résonance Magnétique Nucléaire, Très Hauts Champs	RPE – Résonance Paramagnétique Electronique
IRM – Imagerie par Résonance Magnétique	RX – Rayons X
ITMO – Institut Thématique Multi-Organismes	SATT – Société d'Accélération du Transfert de Technologies
IUT – Institut Universitaire de Technologie	SAXS - Small Angle X-rays Scattering
LDI - Laser Desorption Ionization	SIMS - Secondary-Ion Mass Spectrometry
MALDI – Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization	SMLM - Single Molecule Localization Microscopy
MAS – Magic Angle Spinning	STED - Stimulated-Emission-Depletion
NIR – Near Infra-Red	TGIR – Très Grande Infrastructure de Recherche
PCV – Physique et Chimie du Vivant	UV - UltraViolet
PROTAC - Proteolysis Targeting Chimera	XFEL – X-ray Free-Electron Laser
RDC – Residual Dipolar Coupling	

Note

(1) La Biocatalyse, domaine de l'interface Chimie-Biologie, est représenté en France par le réseau CBSO (Club Biocatalyse et Synthèse Organique) qui fédère une vingtaine de laboratoires

académiques et industries allant de la synthèse organique à l'étude des génomes, et permet l'émergence de nouvelles réactions grâce à des approches intégratives.

SECTION 17

SYSTÈME SOLAIRE ET UNIVERS LOINTAIN

Composition de la section

Benoît MOSSER (président de section), Marie-Christine ANGINON, Aurore BACMANN, Sylvie BRAU NOGUÉ, Laurent CAMBRÉSY, Nathalie CARRASCO, Andrea CHIAVASSA, Marc FERRARI, Kenneth GANGA, Marie-Christine GONTHIER, Aurélie GUILBERT-LEPOUTRE, Pierre HENRI, Gilles KACZMAREK, Kumiko KOTERA, Bertrand LEFLOCH, Sophie MASSON, Jihane MOULTAKA, Jérôme NOVAK, Roser PELLO, Fouad SAHRAOUI, François-Xavier SCHMIDER.

Résumé

La participation de la Section 17 au travail de prospective de l'astrophysique mené par l'INSU a complété l'analyse conjoncturelle. Il en découle un certain nombre de recommandations à destination de la communauté, de l'INSU et du CNRS.

La pratique de l'astrophysique évolue, avec un poids toujours croissant des projets de toutes tailles et un besoin toujours plus fort d'expertises connexes ; ceci modifie notre pratique collective de recherche et doit se retrouver durablement dans les critères d'évaluation pour juger d'une recherche de qualité ; la question du genre doit aussi être débattue collectivement.

La Section 17 souhaite que l'INSU défende vigoureusement le rôle sociétal de l'astrophysique dans la R&D industrielle en haute technologie ; une éventuelle CID traitant des thématiques « astronomie multimessagère et

cosmologie » doit être considérée pour répondre aux enjeux émergents de ce champ disciplinaire commun à l'INSU et à l'IN2P3 ; l'évolution des pratiques de recherche et la montée en puissance de la science des données méritent d'être accompagnées ; l'état d'équilibre des programmes nationaux doit être considéré comme évolutif et non permanent, entre autres pour une bonne gestion des thématiques pluridisciplinaires.

La création d'un poste de DAS thématique pour les champs scientifiques à l'intersection de l'INSU et de l'IN2P3 devrait être envisagée pour que le CNRS parle d'une seule voix dans ce domaine ; l'emploi doit être revu à la hausse, la baisse du nombre de postes de chercheurs et ingénieurs impactant directement la part française dans les projets internationaux cruciaux pour la discipline ; la revalorisation de la recherche passe aussi par un accompagnement des projets des jeunes chercheurs ; pour préparer l'astrophysique de demain, la R&D et l'innovation au CNRS doivent être favorisées par l'ANR.

Introduction

L'astrophysique est une discipline organisée depuis longtemps au niveau national (l'INSU existe comme institut national depuis 1985), structurée par des TGIR nationaux et internationaux, tributaire de grands programmes d'observation au sol ou dans l'espace. Ces éléments motivent un pilotage serré, assuré par l'INSU, et éclairé par un exercice de prospective nationale de l'astrophysique qui réunit de nombreux partenaires dont la Section 17. Des pans entiers de ce rapport de conjoncture bénéficient donc de la prospective nationale menée en 2019 mais l'éclairage apporté à ce rapport est clairement celui de la Section 17, nourri par l'expérience de Section, par l'évaluation des chercheurs et des unités, ou encore par les concours.

La prospective nationale est un exercice pratiqué en moyenne tous les cinq ans, et qui s'est déroulé en parallèle du rapport de conjoncture, de l'automne 2018 à l'automne 2019. Le travail mené par la Section 17 justifie le pilotage par le comité national de la partie de l'exercice de prospective concernant les thématiques scientifiques. Mais comme les travaux détaillés de ces thématiques par les programmes nationaux font l'objet de documents exhaustifs rapportant leur prospective individuelle, ils sont repris essentiellement dans l'exercice de prospective nationale et non dans ce document. Ce choix a pour but d'optimiser les efforts de chaque partie et, surtout, la portée des recommandations. Du travail d'analyse menée par la section sur les thématiques, seule est rapportée ici une synthèse globalement organisée selon les éléments du canevas de l'exercice de conjoncture.

1. Thématiques de la Section 17

La section 17, intitulée « système solaire et univers lointain », couvre tous les domaines de

l'astrophysique. Pour simplifier, toute recherche scientifique qui va des frontières de l'ionosphère terrestre concerne la section 17, exclusivement ou principalement. Les interactions interdisciplinaires sont nombreuses tant à l'INSU qu'en dehors : la Terre, principal objet d'étude des Sections 18, 19 et 30 de l'INSU est une planète, et comme telle se compare aux planètes telluriques ou magnétisées du système solaire ou aux autres planètes des systèmes extrasolaires. Si l'Univers est l'objet d'étude de la Section 17, la physico-chimie qui y est à l'œuvre peut se traiter à l'interface de nombreuses sections de l'IN2P3, l'INP et l'INC. Ce point est plus particulièrement illustré par l'aspect des recrutements et les besoins interdisciplinaires.

A. Thématiques de recherche et évolution

1. Structuration en programmes nationaux

Les enjeux des projets de l'astrophysique et la nécessité d'y apporter des réponses cohérentes à l'échelle appropriée, qui est souvent nationale ou internationale, a conduit à faire évoluer les structures de la discipline en programmes nationaux (PN) qui ont pour mission d'animer et structurer la discipline. Les sept PN de l'astrophysique sont présentés en Table 1 : leur activité est motivée par la réponse à des grandes questions scientifiques ; les observations récentes ont conduit à des ruptures majeures ; les projets futurs laissent envisager des évolutions marquantes.

2. Les grands projets

Les activités des sept PN qui structurent la discipline sont toutes portées par les grands projets. Les PN ont priorisé les projets de la discipline (le plus souvent internationaux) : on note 91 projets d'observations au sol (74 en P0 – la priorité plus haute – 14 en P1 et 3

en P2) et 91 projets spatiaux (71 en P0, 18 en P1 et 2 en P2). L'abondance des projets est à renormaliser à leur durée moyenne longue (plus de 10 ans) et au fait que la précision de ces projets induit une granularité fine, à l'échelle d'un instrument ou d'un sous-système d'une mission plus vaste.

Pour tous les programmes, l'importance des missions s'apprécie par les résultats et avancées passées. On peut citer, sans souci d'exhaustivité, le projet européen *Planck* pour la cosmologie et le milieu interstellaire ; les interféromètres LIGO et Virgo pour le domaine des hautes énergies, le projet *Gaia* de l'ESA pour quasiment tous les secteurs et qui va irriguer la discipline de longues années encore.

3. Évolutions

Différentes thématiques de l'astrophysique ont une activité très visible, avec des champs nouveaux (p.ex. les ondes gravitationnelles), ou en pleine effervescence (p.ex. l'exoplanétologie). D'autres mènent un travail de fond récurrent sur des objets bien connus qui nécessitent et méritent une étude physique très détaillée (p.ex. la physique solaire ou magnétosphérique). Tous les domaines évoluent, comme le montre la Table 1, avec de grands projets depuis le sol ou l'espace amenés à répondre à des défis toujours plus ambitieux.

La tentation est toujours grande de voir l'évolution des domaines à la seule aune de leur visibilité. Le nombre de grands projets fédérant toutes les thématiques, et pas seulement les thématiques visibles, doit corriger cet aspect réducteur.

Thématiques émergentes ou sur le déclin

De nombreux sujets de recherche émergent par l'ouverture de nouveaux horizons essentiellement ouverts par de nouveaux observatoires. On peut ainsi mentionner l'astrophysique multimessagère maintenant envisageable avec le suivi des observations d'ondes gravitation-

nelles, ou encore les nombreux champs disciplinaires vivifiés par le succès de la mission *Gaia*. Les observations *in situ*, tel *Rosetta*, jouent un rôle incomparable en planétologie et se profilent les retours d'échantillons. Les techniques de photométrie ou mesures de vitesse radiale, l'interférométrie, l'imagerie à haute résolution angulaire continuent à élargir les horizons.

L'exemple de la physique stellaire illustre le fait que de nouvelles disciplines poussent de plus anciennes à évoluer : la spectroscopie stellaire n'occupe plus une grande place, mais c'est au profit de nouvelles disciplines telle la spectro-polarimétrie ; les besoins en spectroscopie « classique » sont obtenus par de grandes collaborations internationales, et il existe un besoin de plus en plus pressant de spectrométrie 3D.

Un domaine historique pour l'ouverture aux observations spatiales telle la physique ionosphérique occupe aujourd'hui peu de chercheurs, mais de nouveaux projets spatiaux pourraient inverser cette tendance.

B. Thématiques à l'interface

Les interactions interdisciplinaires de la section 17 sont fortes au sein de l'INSU avec les sections 18 (thématiques relevant de la Terre interne), un peu moins avec la 19 (enveloppes superficielles de la Terre), mais comme le montrent entre autres les concours via le vivier des candidats, les interactions sont très fortes aussi avec les sections 1 (IN2P3), 2 et 4 (INP) du CNRS. Ceci rappelle le double ancrage de la section 17 entre d'une part les Sciences de l'Univers et d'autre part la physique. Les interactions interdisciplinaires avec la chimie sont également importantes car il s'agit de modéliser en laboratoire de multiples réactions que l'on observe dans des conditions particulières dans l'espace, ce qui n'est qu'un exemple parmi d'autres points.

Cette richesse interdisciplinaire concerne aussi de nouvelles disciplines telle l'exobiolo-

gie, impliquant des interactions avec la chimie, bien sûr la biologie, mais aussi les SHS.

1. Exobiologie

L'exobiologie est un domaine en plein essor, qui a besoin de se structurer. Le domaine dépasse très largement le périmètre de l'astrophysique, mais l'INSU a clairement un rôle à jouer pour la discipline. Dans un premier temps, et en l'absence de grands projets engagés aujourd'hui, cette organisation structurelle est à engager dans le cadre ad hoc, avec les interfaces nécessaires à l'INB et l'INC. Ensuite, une feuille de route construite avec les acteurs concernés devra permettre de dégager les priorités du domaine en termes de projets.

2. À l'interface INSU – IN2P3

Plusieurs thématiques de l'astrophysique aux interfaces relèvent conjointement de l'INSU et de l'IN2P3 : la matière noire, l'énergie noire, l'astrophysique des neutrinos et les ondes gravitationnelles. Pour fixer rapidement les idées, la physique de ces objets concerne l'IN2P3 quand leur contextualisation relève de l'INSU. Ceci fut illustré par un recrutement CRCN interdisciplinaire en 2019, fléché vers la thématique des ondes gravitationnelles, demandé par l'IN2P3 pour un laboratoire purement IN2P3, mais instruit par la section 17 et donc l'INSU.

On peut noter que les objectifs et façons de travailler de l'IN2P3 et de l'INSU diffèrent notablement : l'IN2P3 travaille essentiellement par projets et avec des collaborations massives ; l'INSU reste organisé en thématiques. Pour ces raisons, le profil des chercheurs recrutés en 17 est différent de ceux de la section 1. Cette différence de vues, à prendre en compte, renforce la richesse de l'approche interdisciplinaire.

Alors que le travail des communautés concernées par les thématiques communes se fait en bonne entente, l'organisation entre les

instituts concernés ne semble pas être à la hauteur des enjeux : les projets sols et spatiaux nécessaires et engagés pour faire avancer ce domaine nécessitent des moyens financiers et humains non négligeables. Le partage des rôles de chacun gagnerait à être mis à plat et précisé. L'enjeu est d'importance : il s'agit de ne pas rater le train des ondes gravitationnelles et de l'astronomie multi-messagers, domaines montant exponentiellement en ce moment. Aujourd'hui, il faut construire une communauté française solide pour pouvoir contribuer aux découvertes imminentes qui feront l'astronomie de demain.

C. Cohérence du périmètre de la section

En lien avec le paragraphe qui précède pour les problématiques à l'interface IN2P3 – INP – INSU, la section 17 suggère la création d'une CID qui traiterait des thématiques « *astronomie multimessagère et cosmologie* ». La création d'un poste d'un DAS thématique rendant compte aux instituts devrait être étudiée : ceci aurait pour avantage que le CNRS parle d'une seule voix dans ce domaine, pour optimiser le choix et la gestion des projets de la thématique, ainsi que les efforts humains et financiers qu'ils requièrent.

D. Astrophysique et société

Par ses thématiques, l'astrophysique est souvent perçue comme une discipline fondamentalement décorrélée des questions sociétales. Cette perception se doit d'être corrigée, tant par le rôle de la discipline dans la formation des jeunes et la diffusion du savoir (l'astrophysique est un vecteur efficace d'apprentissage des sciences ; elle participe fortement au succès de l'édition scientifique), que par le rôle qu'elle joue dans le secteur de la haute technologie (les missions spatiales de

l'astrophysique participent au soutien en R&D de l'État pour l'industrie de haute technologie). Si une appréciation quantitative de l'implication de l'astrophysique dans la société est difficile, il reste clair que les budgets pour l'astrophysique spatiale percolent dans l'industrie avec un effet multiplicatif largement supérieur à 1.

Par ailleurs, le secteur AA gère plusieurs SO de l'INSU essentiels pour la société : la surveillance de l'espace, la météorologie spatiale, les systèmes de références temporels et spatiaux. Ces aspects sociétaux, cruciaux vu le poids de la haute technologie dans l'industrie française, doivent être défendus par l'INSU. L'astrophysique joue là un rôle unique au sein de l'INSU, à valoriser à la hauteur des enjeux.

Tableau 1 : Les thématiques de l'astrophysique organisées en programmes nationaux, déclinées en grandes questions, ruptures récentes et évolutions actuellement identifiées.

PN	Grandes questions	Ruptures	Évolutions
PCMI : milieu interstellaire	<ul style="list-style-type: none"> - formation des structures à grande échelle dans la Galaxie ; lien avec la formation des étoiles et des planètes ? - rôle du milieu interstellaire dans l'évolution des galaxies. - cycle de la matière entre les différentes phases et accroissement de la complexité moléculaire ? 	<ul style="list-style-type: none"> - premières cartes tridimensionnelles du milieu interstellaire. - mesure routinière du champ magnétique, des échelles galactiques à la formation stellaire. - irradiation des glaces, poussières et molécules, puissant levier d'évolution du milieu interstellaire. - interprétation de la physique des milieux lointains grâce aux molécules et poussières. 	<ul style="list-style-type: none"> - étude des milieux interstellaires extrêmes des galaxies externes. - propriétés de la poussière et du champ magnétique Galactique. - formation stellaire et planétaire détaillée : structure et propriétés des cœurs, des disques et des jets. - astrochimie de précision et inventaire de la complexité moléculaire : l'astrochimie comme prémices de l'exobiologie. - simulation expérimentale de la formation des nanograins dans les enveloppes d'étoiles.
PNCG : cosmologie, galaxies	<ul style="list-style-type: none"> - modèle cosmologique, physique de l'Univers primordial, nature de la matière noire et de l'énergie noire, théories de la gravitation ? - formation et évolution des grandes structures de l'Univers : toile cosmique, distribution des baryons et de la matière noire à grande échelle, milieu intergalactique, groupes et amas de galaxies, réionisation ? - formation et évolution des galaxies : premières galaxies, physique de la croissance et de l'évolution des galaxies en lien avec leur environnement ? - formation et évolution des galaxies aux petites échelles : liens de la formation stellaire avec le milieu interstellaire - populations stellaires, enrichissement chimique, dynamique galactique et matière noire ? 	<ul style="list-style-type: none"> - contraintes <i>Planck</i> sur les paramètres cosmologiques. - diversification des sondes permettant de mieux comprendre l'histoire de la réionisation. - les grandes structures comme sonde de la distribution de la matière (noire et baryonique) aux grandes échelles. - traces d'accrétions en émission et en absorption avec le gaz diffus autour de galaxies à $z=1$ et $z=3$. - contenu en gaz des galaxies jusqu'à $z\sim 3-4$ clef de l'histoire cosmique de la formation d'étoiles. - la Galaxie en 3D ; étude des populations galactiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - physique de l'inflation (énergie et la forme du potentiel) et propriétés de l'énergie noire - distributions de matière noire. - somme des masses des neutrinos et détermination de leur hiérarchie. - contraintes fortes sur les modèles de gravité modifiée. - recherche et étude des sources de la réionisation. - recherche et caractérisation physique des baryons - les baryons dans l'évolution des galaxies : co-évolution baryons / matière noire, quantification des processus internes/ externes de la transformation morphologique des galaxies. - évolution Galactique aux petites échelles : l'archéologie galactique avec la révolution <i>Gaia</i>.

PN	Grandes questions	Ruptures	Évolutions
PNGRAM : gravitation	<ul style="list-style-type: none"> – repousser les limites de la mesure de l'espace et du temps. – vers une compréhension fine de la forme, du mouvement et des propriétés gravitationnelles de la Terre et des corps du système solaire. – jusqu'où les lois fondamentales de la gravitation sont-elles valables? 	<ul style="list-style-type: none"> – repère de référence céleste en optique grâce à <i>Gaia</i> ; repère de référence céleste ICRF3 adopté. – détection directe des ondes gravitationnelles. – première détection du rougissement gravitationnel au voisinage d'un trou noir. – concept de détection des ondes gravitationnelles dans l'espace valide. – universalité de la chute libre vérifiée à 10^{-14} près ; <i>redshift</i> gravitationnel vérifié à 10^{-5} ; comparaison d'horloges optiques à $5 \cdot 10^{-17}$ près. 	<ul style="list-style-type: none"> – repères célestes multi-longueurs d'onde et ultra-précis pour l'astrophysique. – l'univers gravitationnel dévoilé avec les observations multi-messagers et la mission LISA. – de nouveaux tests du principe d'équivalence. – la Terre et le système solaire au peigne fin grâce à la géodésie spatiale et aux données <i>Gaia</i>. – vers une définition optique de l'unité du temps.
PNHE : hautes énergies	<ul style="list-style-type: none"> – phénomènes explosifs : physique des supernovae et des coalescences, nucléosynthèse associée? – rayonnement cosmique : origine, accélération, propagation et impact sur le MIS? – objets compacts : formation, physique de l'accrétion et de l'éjection, pulsars? – nature de la matière noire non-baryonique et les signatures de nouvelle physique? 	<ul style="list-style-type: none"> – naissance de l'astrophysique multi-messagère, – premières détections d'ondes gravitationnelles issues de la coalescence de systèmes binaires de trous noirs. – détection d'une contrepartie électromagnétique à un signal en ondes gravitationnelles émis lors de la coalescence d'étoiles à neutrons. – neutrino de haute énergie en provenance d'un blazar. 	<ul style="list-style-type: none"> – physique des objets compacts et des phénomènes à hautes énergie observée par les ondes gravitationnelles et les neutrinos. – étude des accélérateurs cosmiques grâce à un sondage profond du ciel jusqu'à des énergies extrêmes. – compréhension des mécanismes d'explosions et de coalescence et l'étude des objets compacts par le sondage du ciel transitoire. – synergie entre les instruments de haute énergie et les nouveaux instruments sol.
PNP : planétologie	<ul style="list-style-type: none"> – quels processus physico-chimique gouvernent la formation planétaire, œuvrent à la diversité des objets et sculptent l'architecture des systèmes planétaires? – évolution des objets et des systèmes planétaires : différenciation interne, échanges surface-atmosphère, régimes de circulation atmosphérique, chimie atmosphérique, dynamique gravitationnelle, évolution des objets et systèmes planétaires? 	<ul style="list-style-type: none"> – structure des disques protoplanétaires et de débris (ondes, sillons planétaires...). – découverte de Jupiters chauds et migration des planètes géantes dans les systèmes en formation. – exoplanètes telluriques dans des systèmes proches de la Terre. – activité cométaire, apport des matériaux cométaires, et formation des objets du système solaire. – redéfinition de la zone habitable dans le système solaire. – mesure de la profondeur de la rotation différentielle dans Jupiter et Saturne. 	<ul style="list-style-type: none"> – synergie des méthodes de transits et vitesses radiales permettra de cartographier la diversité des densités planétaires. – caractérisation des atmosphères exoplanétaires. – grands relevés astrométriques et spectrophotométriques des petits corps du système solaire. – retour d'échantillons de comètes, d'astéroïdes et planètes.

PN	Grandes questions	Ruptures	Évolutions
PNPS : physique stellaire	<ul style="list-style-type: none"> – formation stellaire : processus physiques en jeu ? – origine de la fonction de masse initiale des étoiles : est-elle universelle ? – origine évolution du magnétisme de différentes classes d'étoiles ; impact du champ magnétique sur l'évolution stellaire ? – effets de la rotation, du champ magnétique, de la perte de masse... sur la structure et l'évolution stellaire ? – paramètres clefs des interactions étoiles/disques/exoplanètes ? 	<ul style="list-style-type: none"> – au-delà de la seule détection, caractérisation d'exoplanètes de tout type (des Jupiters chauds aux exo-Terres, et aux exoplanètes en zone habitable). – caractérisation des étoiles hôtes. – mesure sismique des paramètres fondamentaux des étoiles (masse, âge, rayon). – populations stellaires et archéologie Galactique. 	<ul style="list-style-type: none"> – caractérisation du magnétisme stellaire par spectropolarimétrie. – imagerie interférométrique des surfaces et des environnements stellaires sur un nombre accru de cibles. – contraintes astérosismiques sur les processus dynamiques dans les étoiles. – raffinement des modèles de formation, d'évolution, de structure et d'atmosphère stellaire. – interactions entre l'étoile et son environnement circumstellaire/planétaire/magnétique.
PNST : Soleil - Terre	<ul style="list-style-type: none"> – Impact environnemental des relations Soleil-Terre : mécanismes de transfert de matière et d'énergie depuis le Soleil jusqu'à la Terre et les planètes ? – Génération et transport du champ magnétique solaire : processus en jeu dans l'accélération du vent solaire ? – Mécanismes de couplages dans les plasmas naturels de l'héliosphère : rôle des interactions champs / particules ? – Mécanismes d'accélération et de chauffage : rôle de la turbulence plasma et modes à l'origine de ces processus d'énergisation ? 	<ul style="list-style-type: none"> – la reconnexion magnétique, mécanisme clé dans les couplages au sein de l'héliosphère ainsi que dans les environnements astrophysiques, notamment lors des processus d'accrétion. – simulations MHD 3D : évolution de la topologie magnétique et des processus de conversion d'énergie lors des éruptions solaires. – turbulence plasma : rôle des petites échelles dans les processus de chauffage et d'accélération des particules 	<ul style="list-style-type: none"> – génération et d'accélération du vent solaire, l'une des composantes clé des couplages dans l'héliosphère, et des processus d'accélération et de transport de particules. – besoin sociétal : étude de la dynamique des interactions entre l'environnement externe, magnétisé, et l'atmosphère de la Terre. – diversité des interactions autour d'autres environnements planétaires ; synergie entre le système Soleil-Terre et l'exoplanétologie

II. Organisation et pratiques de la recherche

A. Organisation et structures

1. Différents niveaux d'organisation

Le paysage local des laboratoires doit évoluer avec la mise en place de nouvelles struc-

tures dans les universités : fusion des universités, COMUE, IDEX, EUR... Cette réorganisation locale fait peu de cas de la logique à d'autres échelles. La communauté astrophysique est en effet bien organisée et structurée au niveau national, qui est le cadre naturel d'activité des équipes dans les laboratoires. Les recherches s'organisent autour de moyens nationaux et des TGIR. Cette structuration nationale est importante et nécessaire pour agir efficacement sur la scène internationale.

Comme la communauté n'est pas très nombreuse, par rapport à d'autres, le cadre national

est le plus pertinent pour discuter les problématiques scientifiques, et la recherche effective se fait de plus en plus via de nombreuses collaborations entre équipes, cette tendance se renforçant avec l'émergence de thématiques inter- ou pluridisciplinaires.

2. UMR

Si la discipline fonctionne avec des PN qui ont pour mission de gérer au niveau national les diverses thématiques, c'est bien sûr dans les UMR que le travail et les projets sont menés. Les unités du domaine de l'astrophysique se caractérisent par un ensemble de mots-clés : pluridisciplinarité ; interdisciplinarité ; recherche instrumentale ; grands projets, infrastructures de recherche et TGIR ; services d'observation ; données ; simulations...

L'attractivité relative des unités est illustrée par les candidatures au concours et le recrutement. De manière générale, les unités qui se sont récemment restructurées autour de projets scientifiques porteurs apparaissent plus attractives que les autres. Ces restructurations ont pu accompagner des regroupements dans de nouveaux sites. La section note le rôle positif d'une restructuration basée sur des projets scientifiques autour des grandes questions de nos disciplines, des missions clairement exprimées, et bénéficiant d'un accompagnement des tutelles à la hauteur des enjeux.

Le regroupement d'UMR apparaît positif avec des projets scientifiques communs, favorisant synergie, stimulation, renouveau, ouvertures, élargissement des compétences, visibilité accrue vis à vis des instances, et en évitant la dilution des équipes techniques et la perte d'expertises.

La taille des unités n'apparaît pas comme facteur déterminant pour la restructuration et l'organisation interne importe moins que les projets. Les unités de la thématique connaissent différents moyens d'organisation : un nombre très limité de grosses équipes ou une multitude de petites équipes ; un directeur seul, ou avec un adjoint, ou avec un comité de direc-

tion. Tous ces différents modèles sont opérationnels, mais mettent en évidence une réalité commune : la fonction de direction mérite d'être valorisée d'une part, et facilitée par des mesures d'accompagnement et de soutien de la part des tutelles des UMR.

3. Programmes nationaux

Les PN jouent un rôle essentiel pour l'animation scientifique autour des grands projets de la discipline, mais ils ont une tendance naturelle à poursuivre les lignes de recherche existantes, et peuvent parfois manquer de la souplesse nécessaire pour favoriser l'émergence de nouvelles thématiques.

La structuration des PN peut montrer un manque de réactivité face à l'évolution rapide de la thématique. Il est clair que les contenus des programmes doivent évoluer régulièrement et s'ouvrir aux interfaces. C'est un enjeu que les exercices de prospective de la discipline ne doivent pas manquer. Ces programmes ont par ailleurs besoin de plus de coordination entre eux et de plus de coordination avec les thématiques en dehors du périmètre de la Section 17. Ces interactions hors de l'INSU gagnent à s'appuyer aux structures usuelles du CNRS telles les GDR.

La communauté gagnerait aussi à avoir une idée plus précise des forces vives impliquées dans les différents programmes. Ce décompte doit être organisé par l'INSU de manière la plus uniforme possible, prenant en compte la participation (pondérée) des chercheurs et enseignants-chercheurs aux différents programmes, et mesurant aussi les services d'observations et le poids des projets.

4. Le poids des projets

Pour faire avancer les enjeux scientifiques, il apparaît un besoin contradictoire entre plus de projets et des projets plus lourds, et de plus d'espace entre les projets. Alors même que la communauté est organisée pour choisir et prio-

riser ses projets, la section ressent le besoin de faire plus de choix et plus de priorités lors de l'exercice de prospective national de l'astrophysique. En un certain sens, on note une évolution pilotée par les projets.

B. Recrutements et carrières

1. Méthodes

La réflexion en début de mandat sur notre pratique de travail en section, pour définir les critères d'une recherche de qualité, a conduit à quelques grands principes :

- prise en compte de tous les types de production scientifique (réalisations instrumentales et numériques, très spécifiques de nos projets) et pas seulement les publications ; c'est particulièrement important pour notre discipline dépendant de l'observation, du besoin d'instruments performants que seuls les chercheurs peuvent imaginer et développer, et des données observationnelles ;

- évaluation qualitative et non quantitative du travail de recherche, nécessaire en soi et indispensable pour éviter de nombreux biais.

2. Besoins d'expertise

Notre discipline évolue avec le besoin croissant de profils avec des expertises très pointues (physique de laboratoire, instrumentation, traitement du signal, simulations numériques, science des données). Comme le haut niveau d'expertise nécessaire n'est alors pas forcément directement compatible avec un fort investissement sur le volet astrophysique, il ne permet pas de publier dans le champ thématique. Quand bien même cette situation est prise en compte dans les critères de qualité définis pas la section, la communauté doit aussi en prendre la mesure, et être inclusive dans ses pratiques de publications par exemple, afin de ne pas laisser sur la touche les experts sans lesquels l'efficacité du travail scientifique n'est pas possible.

3. Équilibres

La compétition entre les différents PN se voit sur les recrutements. L'importance des projets dans tous les PN conduit à préserver le poids relatif des communautés des divers PN dans les recrutements CRCN, ce qui rend plus difficile le recrutement de profils sur des thématiques émergentes et des profils interdisciplinaires.

La communauté se dirige de plus en plus vers des projets de grande envergure et à grandes collaborations. L'évaluation de l'individu devient difficile dans ce contexte. Il est donc important de pouvoir valoriser, aussi bien les travaux d'un chercheur travaillant dans une grande collaboration que ceux d'un chercheur travaillant en petit comité.

Les concours éclairent un aspect négatif de certains grands projets, qui utilisent les forces vives de nombreux doctorants et post-docs, mais ne leur donnent pas les moyens de développer efficacement les qualités requises pour un recrutement (impact de la production scientifique au sens large ; autonomie avérée ; pertinence du projet de recherche). Cet écueil est d'autant plus marqué que les disciplines concernées bénéficient d'un engouement lié à l'attractivité des sujets.

4. La question du genre

Biais avérés

Différents indicateurs étudiés en début de mandat ont démontré les forts biais de genre. Le bilan social du CNRS établit que la proportion de femmes est moindre chez les CR (~ 20%) par rapport au DR (~ 23%) ; par ailleurs, cette proportion est très inférieure à la proportion de candidates (~ 35%). Ceci signe le fait que la compétition pour les postes qui s'est fortement accrue ces vingt dernières années d'une part, avec la montée en puissance des indices bibliométriques d'autre part⁽¹⁾, a conduit à décimer le recrutement féminin. Le recrutement à l'ancien niveau CR1 était particulièrement biaisé en termes de

genre, pour partie en raison du déficit de candidatures féminines à un âge de thèse avancé.

Recrutements

Ce constat étant clairement posé, la section a analysé ses différentes pratiques d'évaluation en termes de genre, pour évaluer les biais et les corriger. Une correction indispensable consiste à constater que, par rétroaction avérée des biais, la proportion de candidates est minorée et ne constitue donc pas un indicateur pertinent pour estimer la proportion de recrutées.

En pratique, ces éléments étant intégrés dans le processus de recrutement, comme de nombreux autres, ce n'est plus la question du genre qui se pose plus durant les concours, mais celle de l'excellence scientifique, qui n'est pas genrée. À l'issue de trois concours, sur la base des critères affichés pour une candidature de qualité (impact, autonomie, projets), on constate un recrutement à parité.

Promotions

Un exemple éclaire particulièrement les biais de genre au cours de la carrière : le nombre de candidatures de femmes CR à la PEDR est le plus souvent nul ou voisin de zéro, pour typiquement une vingtaine de candidatures masculines. Les biais de genre dans les carrières sont si prégnants que leur correction devrait commencer bien avant les âges de pratique de la recherche.

À tous les niveaux, les biais de genre doivent être corrigés. Comme pour les concours, une correction simple à apporter est de sortir d'un système où la proportion de femmes candidates est respectée dans l'évaluation, car ce système reproduit les biais. Comme la section ne peut pas corriger l'absence de dossiers féminins, la communauté doit se mobiliser pour agir contre l'autocensure des candidates.

La correction des biais de genre ne se fera ni rapidement ni sans frottement, et donc elle

nécessite un suivi au très long terme de l'évolution de la parité dans la discipline.

5. Début de carrière

On observe un hiatus entre les critères de recrutement, où l'on demande à un jeune chercheur d'avoir acquis de l'autonomie, et les conditions de début de carrière, où les jeunes recrutés sont le plus souvent happés par un projet ou n'ont pas les moyens d'exprimer leur autonomie. Il serait pertinent d'associer à chaque recrutement une enveloppe financière "tremplin" dont le montant annuel pourrait correspondre au montant moyen alloué par les PN (environ 5k€) et le financement d'un stagiaire au niveau M2 (environ 3 k€).

6. Personnels d'appui

L'importance des projets dans la discipline renforce l'importance des personnels d'appui. La section 17 fait sienne la recommandation émise en janvier 2016 par le CSI de l'INSU au sujet du recrutement des ITA : *« Une recherche de qualité avec un impact fort à l'international nécessite un équilibre des forces entre les personnels chercheurs, ingénieurs et techniciens. Cet équilibre est critique pour de nombreuses disciplines du CNRS et en particulier pour celles dans le périmètre de l'INSU. »*

La baisse continue des moyens humains IT dans les laboratoires crée souvent des tensions entre les équipes. De plus, les jeunes chercheurs recrutés avec une vocation instrumentale se retrouvent souvent sans le soutien nécessaire par les équipes techniques pour démarrer et porter de nouveaux projets.

7. Démographie

Baisse du nombre de chercheurs

Le nombre de chercheurs en section 17 a baissé de plus de 15% en 12 ans. La section 17 bénéficie pourtant d'un grand pouvoir d'at-

tractivité, avec un taux de pression sur les candidatures parmi les plus forts dans le domaine des sciences dites dures. Parmi les sections relevant de l'INSU, la section 17 se caractérise par une attraction beaucoup plus forte, avec un taux de pression moyen sur les postes CRCN de l'ordre de 30, contre 12 en sections 18 et 19 (soit le taux le plus bas sur l'ensemble du CNRS) le nombre de postes étant par ailleurs égal.

La bonne santé de l'astrophysique française dans la compétition mondiale

Les différentes enquêtes sur le poids mondial des disciplines montrent également que l'astrophysique française est rayonnante⁽²⁾. Pourtant, la baisse des effectifs impacte les projets et donc le rayonnement international. Le choix de la communauté est actuellement de pérenniser l'emploi tant pour les chercheurs que pour les personnels d'appui à la recherche.

Projets et R&D

Le manque de recrutement dans le corps du CNAP dans certains labos à forte implication dans les missions spatiales fait que le travail de suivi à long terme de ces projets (développements hardware/software, bases de données...) repose donc également sur les chercheurs CNRS qui se retrouvent aspirés par ces responsabilités semblables aux tâches de service du CNAP : comme cela impacte directement leur productivité scientifique, cette activité doit être prise en compte dans leur mission.

Par ailleurs, la baisse des effectifs et la part plus importante des projets a un impact lourd sur le plan de charge des laboratoires. Avec un recrutement en net déclin, il n'y a plus la place ni le temps pour la R&D, les projets émergents, la mise au point de démonstrateurs.

Le cas de l'Île-de-France

Un autre fait démographique préoccupant consiste en l'évaporation des jeunes cher-

cheurs de l'Île-de-France vers les régions. Ce phénomène serait positif s'il signalait une forte attractivité en régions ; il signe plus clairement une situation francilienne dégradée, avec des salaires pour les jeunes chercheurs tout simplement trop bas pour des conditions de vie à la hauteur d'un métier nécessitant un grand investissement temporel, de nombreux déplacements... Le même phénomène est observé pour les personnels de soutien à la recherche.

Pression sur les chercheurs

Enfin, il faut noter que, via les rapports d'activités, la section peut se rendre compte de l'impact de la baisse des ressources sur le travail des chercheurs, la quantité de travail requise par les projets ne baissant pas et la recherche de financement prenant de plus en plus de temps. De nombreux chercheurs brillants et talentueux mentionnent le découragement vis-à-vis de conditions de travail se dégradant pour eux, leurs équipes ou leurs collègues.

8. Bonnes pratiques

Réponse à l'urgence climatique

De par son rôle pour le recrutement et l'évaluation des chercheurs, la section est particulièrement concernée par l'impact climatique de l'activité de recherche. Comme l'a montré une enquête interne, la grande majorité des acteurs de la recherche relevant de la section 17 se sent concernée par cette urgence et souhaite minimiser l'impact des pratiques professionnelles. En ce sens, la section rappelle que ses critères d'évaluation sont avant tout qualitatifs, et non quantitatifs. Si les jeunes chercheurs ont besoin de faire connaître leur recherche et si certains projets nécessitent des réunions régulières des acteurs, il n'est ni sain ni nécessaire de multiplier les déplacements et la qualité des dossiers ne s'apprécie pas au nombre de conférences invitées.

C. Financement

De manière générale, il y a orthogonalité entre les sources de financement de la recherche et la structuration thématique de la recherche. Les programmes se développent en effet sur des échelles de temps longues. Si l'INSU et le CNES accompagnent les projets en apportant des financements respectant ces échelles, les autres sources de financement restent limitées sur des échelles de temps courtes. L'ANR par exemple ne connaît qu'une échelle de temps, n'accompagne pas les grands projets et soutient trop peu les priorités thématiques de la prospective au niveau national. L'ANR devrait jouer un rôle accru vers la R&D et l'innovation, pour faire émerger des projets nouveaux.

Au niveau national, le manque flagrant de financements constitue une menace pour l'activité des équipes/laboratoires, par exemple pour subvenir aux besoins d'équipement des laboratoires, soutenir la R&D et les projets émergents. Vu l'organisation avec les PN, on pourrait imaginer qu'ils irriguent la discipline dans le cadre de coordination qu'ils assurent, mais ils n'ont pas la dotation nécessaire pour un accompagnement scientifique suffisant des grands projets, et irriguer les laboratoires. Ceci impacte la vie scientifique organisée en collaborations d'équipes au niveau national.

Avec un faible taux de succès des ANR blanches, une décorrélation observée entre les choix des comités et les priorités scientifiques des instituts apparaît finalement une source de démotivation profonde, alors que la multiplication des appels d'offres d'initiatives d'excellence (au niveau local ou non), sans aucune cohérence avec les priorités de la discipline, définies au niveau national, ne joue aucun rôle structurant. Les financements de type ERC ont un faible taux de succès et sont accordés à des individus. Pour ces raisons, on ne peut pas compter sur eux pour apporter une meilleure gestion des ressources humaines ou améliorer le travail collectif dans les projets.

L'inflation administrative liée au saupoudrage des demandes de financements, impac-

tant l'activité des demandeurs de financement tout comme celle des *reviewers*, pourrait être fortement diminuée en minimisant l'existence des financements partiels (par exemple : demi-bourses de thèse, demi-financement de congrès...) pour favoriser des financements complets. A budget constant, le temps de rédaction, d'évaluation et de traitement des dossiers de financement serait ainsi optimisé.

D. Évolutions méthodologiques

1. Méthodes

Les précédents rapports de prospectives notent de manière récurrente le poids important des techniques observationnelles. On peut notamment citer l'importance actuelle des techniques d'interférométrie, sismologie, astrométrie, spectropolarimétrie, vélocimétrie, spectroscopie à haute capacité multiplex et à intégrale de champ (cf. Table 1). Les expériences de laboratoires continuent également à jouer un rôle crucial.

2. Science des données

Données massives

Le poids des sciences des données, tant observées qu'issues de simulations, va croissant. En astrophysique, ceci peut être illustré par la taille du catalogue du projet *Gaia* (1.7 milliard d'objets) ou par la production de données d'un grand télescope au sol chaque nuit, pouvant se chiffrer en téraoctets, ou encore par les téraoctets de données simulées. Ceci confirme la pertinence des efforts positifs déployés dans le passé pour une mise en place efficace des outils et l'archivage (rassemblés sous le sigle OV = observatoire virtuel). Ces efforts doivent être poursuivis et ceci passe par :

– un nombre croissant de chercheurs avec un profil numérique, "*data scientist*", sur le

modèle de la fonction “*instrument scientist*” usuelle dans la discipline ;

– des financements en soutien à des programmes liés à l’exploitation de données (que typiquement l’ANR ne sait pas financer).

La taille des projets motive des liens plus forts à établir avec les Sections 6 et 7 de l’Institut des sciences de l’information et de leurs interactions (INS2I), les grands projets de la discipline fournissant un champ d’application pour les sciences de l’information, que ce soit en termes de calculs, algorithmes, représentations, exploitations (section 6), ou de signaux, images, systèmes intégrés matériel-logiciel (section 7).

L’évolution vers les données massives est réelle, anticipée par la communauté, prête par des pratiques telles la valorisation des données par les méthodes d’observatoire virtuel, l’investissement dans les domaines émergents d’intelligence artificielle et d’apprentissage automatique. Les enjeux sont d’autant plus importants que de fortes ruptures sont attendues, et qu’il s’agit d’une terra incognita propre à la démarche de recherche.

Moyens numériques

Les simulations numériques ont un rôle essentiel dans la recherche en astrophysique, tant par les concepts théoriques qu’elles permettent d’explorer et de comprendre que dans l’interprétation des observations. À cet effet, l’utilisation des simulations numériques HPC (High Performance Computing) est en plein essor et les moyens humains et matériels actuels ne permettent pas de répondre aux enjeux futurs, tel le développement de la modélisation multi-échelle ou le passage à l’*exascale*. En effet, l’ajout de physique dans les codes numériques pour modéliser des systèmes de plus en plus complexe relève des chercheurs, tandis que la parallélisation, l’optimisation, la mise à jour et le portage des codes sur les nouvelles machines (en constante évolution) nécessitent les compétences et expertises spécifiques des ingénieurs en calculs scientifiques. Afin de poursuivre les dévelop-

pements à la pointe en simulation numérique, la communauté AA a besoin :

– d’être soutenue techniquement par des ingénieurs en calcul scientifique qui sont à l’heure actuel quasi-inexistants dans le paysage des laboratoires. Ceci passe par le recrutement de ces profils d’ingénieurs dans les laboratoires ;

– de valoriser les pratiques collectives permettant de développer et maintenir les codes numériques communautaires (par ex : SNO).

CONCLUSION

De l’analyse de la section ressortent les points marquants :

– l’astrophysique est une thématique avec de nombreux projets, forte sur la scène internationale, se structurant toujours plus en projets de toutes tailles, nécessitant des expertises pointues, ayant déjà abordé le virage vers le traitement massif de données ;

– comme les grands projets prennent une part croissante, notre pratique collective de recherche doit évoluer, et les critères d’évaluation pour juger d’une recherche de qualité doivent évoluer de concert ;

– la question du genre doit aussi être débattue collectivement ;

– le rôle sociétal de l’astrophysique dans la R&D industrielle en haute technologie doit être défendue plus fermement ;

– une éventuelle CID traitant des thématiques « *astronomie multimessagère et cosmologie* » améliorerait les interactions entre l’INSU et l’IN2P3 ; la création d’un poste de DAS thématique pour les champs scientifiques à l’intersection de l’INSU et de l’IN2P3 (la physique et l’astrophysique des objets émetteurs d’ondes gravitationnelles) devrait être envisagée pour que le CNRS parle d’une seule voix dans ce domaine ;

– l’évolution des pratiques de recherche et la montée en puissance de la science des don-

nées méritent d'être accompagnées; l'état d'équilibre des programmes nationaux doit être considéré comme évolutif et non permanent; la section constate un fort besoin de restructuration pour certaines thématiques, dont l'exoplanétologie;

– la baisse du nombre de postes de chercheurs et ITA en astrophysique impacte direc-

tement la part française dans les projets internationaux cruciaux pour la discipline;

– la revalorisation de la recherche passe aussi par un accompagnement des projets des jeunes chercheurs;

– pour préparer l'astrophysique de demain, la R&D et l'innovation au CNRS doivent être favorisées par l'ANR.

ANNEXE 1

Sigles

CNAP : conseil national des astronomes et physiciens

IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

INC : institut de chimie du CNRS

INP : institut de physique du CNRS

INSU : institut national des sciences de l'Univers

PN : programme national

PCMI : programme national physique et chimie du milieu interstellaire

PNCG : programme national de cosmologie et galaxies

PNGRAM : programme national gravitation références astronomie métrologie

PNHE : programme national hautes énergies

PNP : programme national de planétologie

PNPS : programme national de physique stellaire

PNST : programme national Soleil-Terre

SNO : service national d'observation

TGIR : très grandes infrastructures de recherche

Notes

(1) Que ces deux phénomènes soient liés ou non n'a aucune importance.

(2) Cf. rapport de l'OST : *La position scientifique de la France dans le monde 2000-2015*, dont les graphes 17a et 17b illus-

trient la plus forte position française en Sciences de l'Univers par rapport aux USA, à l'Angleterre et l'Allemagne; le graphe 25 illustre la forte internationalisation des publications, plus forte que dans tous les autres secteurs.

SECTION 18

TERRE ET PLANÈTES TELLURIQUES : STRUCTURE, HISTOIRE, MODÈLES

Composition de la section

Philippe CARDIN (président de section), Étienne DELOULE (secrétaire scientifique), Denis ANDRAULT, Pierre-Yves ARNOULD, Vincent BALTER, Nicolas BELLAHSEN, Frederick BOUDIN, Pierre CARTIGNY, Marcia MAIA, Stéphanie DUCHÊNE, Anne DUPERRET, François GUILLOCHEAU, Caroline MARTEL, Élise NARDIN, Tanguy NEBUT, Séverine ROSAT, Philippe ROUX, Violaine SAUTTER, Martine SIMOES, Gabriel TOBIE, Emmanuel TRIC.

Résumé

Notre planète est devenue habitable au cours de son histoire. Quelles sont les raisons qui expliquent son évolution, différente de celle des autres planètes telluriques? Pouvons-nous prédire l'habitabilité des exoplanètes? Questions ouvertes qui nous imposent de continuer à observer, étudier, non seulement les planètes telluriques mais aussi les archives de notre passé pour proposer une histoire contrainte qui explique la structure et la composition actuelle du globe, le fonctionnement de sa lithosphère et de ses reliefs, l'émergence et l'évolution de la vie, et le contrôle des divers processus reliant l'intérieur du globe à sa surface. L'acquisition de données de terrain, géophysiques et géochimiques et l'utilisation d'algorithmes numériques d'analyse de données sont nécessaires. Cependant, ces informa-

tions ne seront comprises que si elles sont intégrées dans des modélisations conceptuelles et physico-chimiques contraintes, qui, en retour, éclairent les morceaux de puzzle manquants de l'histoire de la Terre. Cette démarche est celle à l'œuvre dans la prédiction, non suffisamment performante à ce stade, de l'évolution des systèmes naturels telluriques (séismes, volcans, instabilités gravitaires, tsunamis, orages magnétiques...), d'autant plus qu'ils présentent un risque pour nos sociétés. Des progrès sont attendus même si la physique complexe, multi-échelles et multi-paramètres, alliant temps courts et temps longs, reste un défi. Enfin, la connaissance des sous-sols, de leurs ressources (minerais, hydrocarbures, géothermie, stockages...), de leur formation et évolution doit être une préoccupation majeure de notre communauté du fait des implications économiques, sociales et politiques.

Introduction

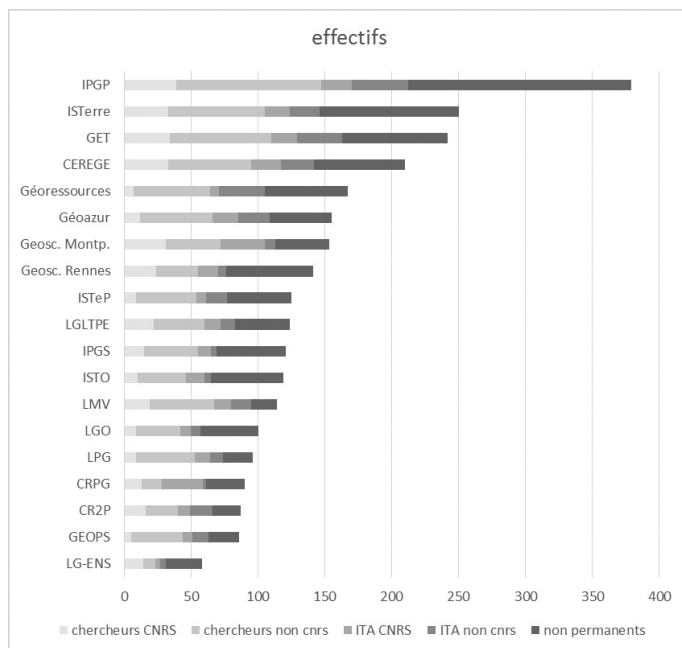
La section 18 s’attache à développer les connaissances scientifiques sur le système Terre / planètes telluriques. Elle se place dans une longue tradition qui s’intéresse à la description et à la compréhension du monde qui nous entoure, de l’échelle microscopique à l’échelle planétaire. Ce travail est – par nature – pluridisciplinaire, intégrant observations naturalistes, mesures géophysiques, analyses géochimiques, expérimentation pétrologique, modélisations physiques et mathématiques, ainsi que l’exploration spatiale des autres planètes telluriques.

De tout temps, nos disciplines ont contribué à l’essor de nos sociétés par l’identification de ressources minérales et énergétiques, l’évaluation des aléas telluriques, et plus fondamentalement en découvrant le fonctionnement du système Terre et de son histoire. Notre quête a aussi permis de développer de nombreuses méthodes ou concepts – tels que l’analyse géochimique isotopique ou l’inversion de don-

nées – qui ont très largement bénéficié à d’autres disciplines.

Aujourd’hui⁽¹⁾, 32 laboratoires (Unités Mixte de Recherche) sont rattachés à la section 18, dont 19 en rattachement principal et 7 en second rattachement. Les 19 laboratoires en rattachement principal comptent 2 817 personnes dans leurs effectifs, dont 1 226 chercheurs « permanents », comprenant 326 chercheurs CNRS.

Le nombre de laboratoires de la section 18 a diminué au cours de la dernière décennie du fait de restructurations en grosses unités (IPG Paris, ISTerre Grenoble, Géosciences Environnement Toulouse, Géosciences Montpellier...). Voulue par les tutelles, cette restructuration permet de mutualiser plus facilement les ressources financières, les équipements et les fonctions support, ainsi que d’assurer une certaine visibilité à nos recherches. Un regroupement est en cours à Strasbourg entre l’Institut de Physique du Globe de Strasbourg (section 18) et le Lyghes (section 30). En revanche, notre communauté reste assez dispersée sur le site de Lille (3 unités) et dans une moindre mesure à Toulouse (GET et IRAP) et Nancy (Géoresources et CRPG).



Cinq unités (GET, ISTerre, Géoazur, CEREGE, LMV) ont aussi pour tutelle l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), comprenant 62 chercheurs permanents IRD à comparer aux 167 chercheurs CNRS et 307 enseignants chercheurs. Les cibles géographiques de l'IRD dans notre domaine sont les pays andins, l'Indonésie, l'Afrique de l'ouest, l'Inde, le Liban et l'Algérie, offrant ainsi bien souvent l'accès à des sites uniques tout en développant des collaborations avec les chercheurs de ces pays.

En plus des tutelles universitaires locales, nous comptons le Muséum National d'Histoire Naturelle (CR2P et IMPMC), le CNES (LPG et GET), le BRGM (ISTO), l'INRA (CEREGE) et IFSTTAR (ISTerre). Enfin, notons le statut particulier de l'UMR Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), seule unité du grand établissement éponyme.

Notre communauté scientifique s'appuie principalement sur deux sections puisque 17 des 32 unités s'inscrivant en section 18 émarquent aussi en section 30 (section commune entre l'INSU et l'INEE), couplant ainsi « géologie profonde » et « géologie de surface », et partageant de ce fait méthodes et questionnements. Plus précisément, sur les 19 unités en rattachement principal de notre section, 9 ont pour rattachement secondaire la section 30. Notons que plus de 50 chercheurs de la section 18 sont dans une unité ayant la section 30 comme section principale de rattachement. Enfin, la structuration en OSU (Observatoire des Sciences de l'Univers) dans de nombreux sites favorise naturellement les liens scientifiques entre les communautés de l'INSU et de l'INEE, même si la reconnaissance des OSU par les universités hôtes est variable selon les sites.

Les couplages sont forts avec la section 19 (8 unités en commun), illustrant les nombreuses interactions entre Terre solide et enveloppes fluides, ou encore notre intérêt commun pour les évolutions climatiques.

Les laboratoires impliqués en paléontologie (7 unités) sont aussi rattachés à la section 29 (rattachée à l'InSB) qui s'intéresse à l'évolution du monde vivant.

Notons enfin un tropisme fort vers les sections 9 et 10 (sciences de l'ingénieur) pour les techniques d'acoustique, de mécanique du solide et des fluides (3 et 3 unités respectivement).

Étonnamment, seules deux unités (LPG et IRAP) assurent un lien structurel avec la section 17 d'astrophysique, et ceci principalement autour de la planétologie.

Les 19 unités principales de la section 18 ont une bonne production puisque 2 579 articles ont été publiés en 2017 selon ISI WoK, soit 2.1 articles par chercheur. Ces 19 laboratoires cumulent 100 000 citations fin 2017 et assurent une large visibilité et valorisation de notre travail au niveau international. Cette reconnaissance est mesurable grâce aux 25 médailles des deux grandes sociétés savantes de notre domaine, à savoir l'American Geophysical Union (AGU) et l'European Geophysical Union (EGU). Notons aussi les 38 AGU fellows de nos laboratoires qui font de la France le premier pays étranger primé par l'AGU. Le classement de Shanghai, dans le domaine « Earth Science » fait apparaître 6 universités françaises dans le top 50 (classement 2018), par exemple l'université Paris 7 (IPGP) à la 12^e place et l'université Grenoble Alpes (ISTerre) à la 18^e place. En ce qui concerne les financements, notre communauté a été lauréate de 50 ERC cette dernière décennie. Ces projets d'excellence permettent de dynamiser les questionnements scientifiques dans les laboratoires, de maintenir des équipements de pointe et de financer des jeunes chercheurs.

Notre section compte un peu plus de 300 chercheurs avec autant de chargés de recherche (CR) que de directeurs de recherche (DR). Ce nombre s'est érodé cette dernière décennie (baisse de l'ordre de 10%). La proportion de femmes est de l'ordre de 30% sur l'ensemble de la section, 35% dans le corps des CR et 25% dans celui des DR. Ces chiffres doivent être mis en regard des chiffres des sections CNU 35 et 36 qui réunissent les enseignants chercheurs de nos disciplines. Alors que l'effectif global de ces deux sections a augmenté de 4% sur les 20 dernières années, il ne comprend qu'un ratio de 26% de femmes (ce ratio

descend à moins de 15% dans le corps des professeurs). Fait assez rare, nous venons de promouvoir une directrice de recherche à la classe exceptionnelle en section 18.

Concernant les recrutements, la section 18 a recruté 64 chargés de recherche (dont 18 femmes) depuis 2009, soit de l'ordre de 6 postes/an en moyenne (5.8), avec une répartition géographique en lien avec la taille et le dynamisme des laboratoires (15 à Paris, 8 à Toulouse, 6 à Lyon, Grenoble et Nancy, 4 à Lille et Clermont-Ferrand...). Depuis 2009, 72 personnes (dont 23 femmes) ont été promues directeur de recherche, soit 6,5/an.

Bien qu'en partie subjective, nous avons classé les 305 chercheurs de la section en trois groupes thématiques significatifs de notre histoire : Géophysique (42%), Géologie (30%) et Géochimie (28%). La Géophysique comprend la sismologie, la géodésie, la gravimétrie, le géomagnétisme, la minéralogie haute pression et la géodynamique globale. La Géologie comprend la tectonique, la pétrologie, la volcanologie, la paléontologie, la stratigraphie et la sédimentologie. La Géochimie inclut aussi la cosmochimie et la géochronologie. Ces nuances correspondent à des métiers dont l'excellence est nécessaire pour faire avancer nos questionnements scientifiques, qui eux, ne se posent plus en termes de sous-disciplines mais en termes de description et de fonctionnement du « système planète ». C'est d'ailleurs de cette manière que nous avons décidé de présenter une sélection de nos thématiques de recherche les plus actives et intégratives.

I. Âge et durée des processus planétaires

Des temps longs aux temps courts : mieux connaître les caractéristiques temporelles de la dynamique terrestre pour

mieux comprendre la planète d'aujourd'hui.

Les enjeux liés au changement climatique, à l'épuisement des ressources fossiles ou aux risques naturels volcaniques et sismiques imposent de travailler à une échelle de temps d'observation et d'anticipation qui est celle du siècle. Face à l'accélération des bouleversements environnementaux, les géosciences apportent une vision à une échelle de temps toute autre, celle de la durée de vie de la Terre. Tout au long de son histoire, la Terre a subi de nombreuses crises et transitions, dont il est important de mesurer les âges, les durées et les fréquences pour pouvoir en analyser les mécanismes et les conséquences.

Le développement des techniques de datation *in situ* a permis de gagner en précision spatiale pour atteindre des échelles micrométriques voire nanométriques et ainsi distinguer des événements proches, par exemple les différentes phases de la croissance d'un minéral. Le développement continu de la thermochronologie et de la datation des surfaces par les isotopes cosmogéniques et par luminescence dynamise l'étude des reliefs. Dans le domaine de la tectonique et de la déformation active, les méthodes d'observation spatiale (GNSS, INSAR, imagerie optique) permettent d'évaluer les déplacements horizontaux et verticaux de la lithosphère à partir de banques de données couvrant plusieurs décennies et avec une fréquence croissante, ce qui permet de déceler des mouvements de plus en plus lents et petits, et d'améliorer notre connaissance de leur cyclicité. Tous les domaines des géosciences sont concernés par la recherche des paramètres temporels, mais on peut retenir parmi les sujets d'actualité les exemples suivants.

De la vitesse des processus tectoniques à l'activité sismique. L'activité sismique se déroule sur des temps courts, mais répond au déplacement lent et en partie asismique des plaques tectoniques sur le long terme. Or, l'estimation des vitesses de déformation passées est un verrou persistant, qu'il faut s'attacher à lever par la datation des marqueurs de la déformation ou des minéraux dans les zones de failles (micas, calcite).

Persistance des réservoirs magmatiques et vitesse des processus de recharge et de vidange. Une éruption volcanique est un événement catastrophique de dégazage et d'ascension de magma dont la durée s'exprime en heures ou en jours, mais qui est en lien avec des processus plus longs de recharge ou de vidange des réservoirs magmatiques en profondeur (en mois ou milliers d'années). D'autre part, la durée de vie des systèmes sources des magmas, la fusion partielle en base de croûte et dans le manteau, qui s'étale sur des millions d'années, est mal connue. Expliciter les processus qui s'emboîtent dans ces sauts d'échelles de temps et d'espace est un enjeu.

La formation des ressources, un processus lent et incertain. La genèse des ressources minérales ou énergétiques est l'aboutissement d'un long enchaînement d'évènements de temps caractéristiques divers. La récurrence des événements minéralisateurs à l'échelle régionale et leur distribution dans l'histoire de la Terre restent souvent mal connues. Dater les différentes étapes de la formation des pétroles ou des ressources minérales et définir la durée de chaque étape est une suite de défis à relever.

Vitesses des changements environnementaux du passé. La réaction des enveloppes superficielles aux forçages naturels et aujourd'hui anthropiques est au cœur des enjeux environnementaux. La détermination de la durée des crises et du retour à l'équilibre ou de la durée des phases de transition dans les périodes récentes ou plus anciennes se pose dans de nombreux domaines : les crises biologiques, les variations des paramètres climatiques, l'évolution de la chimie de l'atmosphère et de l'hydrosphère ou encore les variations du niveau des mers.

Durée des processus d'accrétion et de différenciation planétaire. Si la chronologie de la différenciation noyau/manteau des corps parents des météorites peut être abordée de manière directe, celle de la planète Terre reste un champ d'exploration. À la lumière des données géochronologiques et isotopiques récentes, l'âge et la vitesse d'extraction de la croûte terrestre sont toujours sujets à débat.

II. Diversité des planètes telluriques

Caractériser la diversité des planètes et des processus planétaires pour mieux comprendre comment les planètes se forment et évoluent, et ainsi identifier les spécificités de la planète Terre.

Caractérisation des intérieurs planétaires : Malgré les avancées majeures de l'exploration spatiale au cours des deux dernières décennies, la structure interne des planètes telluriques reste mal contrainte. Difficile, par exemple, de quantifier précisément la taille des noyaux de Vénus ou de Mars, sans parler de la taille de la graine quand celle-ci existe. Ce sont pourtant des informations cruciales pour discuter de leurs conditions de formation (composition chimique, état thermique), de leur dynamique interne et leur évolution à long terme, et de les comparer avec la Terre.

Le premier sismomètre martien développé par la France est opérationnel depuis début 2019 et ses résultats sont attendus pour définir un modèle complet de la structure interne de Mars. En parallèle, la découverte d'exoplanètes de type terrestre motive le développement de nouvelles équations d'état pouvant être appliquées à des conditions de pression, de température et de composition sensiblement différentes de celles rencontrées sur Terre. Une grande diversité de structures internes, associée à des évolutions géodynamiques variées (mode de convection, dynamique de la lithosphère, géodynamo) sont en cours d'études.

Étudier l'ensemble des planètes dans notre système solaire et au-delà permettra de mieux comprendre les facteurs clés contrôlant l'histoire géodynamique d'une planète et de mieux comprendre les spécificités de notre planète.

Les premiers instants des planètes : L'analyse de météorites et d'échantillons lunaires apportent des contraintes clés sur les premiers

instants du système solaire. Une variété de traceurs géochimiques nous renseigne sur les processus de formation des embryons planétaires, puis des planètes, à partir des briques élémentaires. Pourtant, le développement de modèles physiques cohérents reste un défi. Notre compréhension des processus de fractionnement dans les disques proto-planétaires, ainsi qu'au cours des étapes successives de la formation et de la différenciation planétaire, a besoin d'être affinée, ce qui implique l'acquisition de données géochimiques et la réalisation d'études expérimentales toujours plus pointues.

La collision entre des objets de taille planétaire, qui, sur Terre, a entraîné la formation de la Lune, est un processus crucial. Reproduire expérimentalement et numériquement les conditions extrêmes atteintes pendant ce processus demeure un défi majeur. Ceci est nécessaire pour mieux quantifier les conséquences des océans magmatiques et de la cristallisation du manteau sur la ségrégation des grands réservoirs planétaires.

Couplage planétaire et habitabilité: L'évolution planétaire est modulée par d'importants couplages externes, à savoir des impacts planétaires, des interactions avec les enveloppes externes et les mouvements orbitaux et rotationnels. Les interactions de marée ont, par exemple, joué un rôle clé dans l'évolution de Mercure, de Vénus, du couple Terre-Lune, d'une grande partie des lunes du système solaire externe, et dans la plupart des exoplanètes que l'on découvre actuellement. Entre autres, les forçages mécaniques dus aux impacts et aux forçages de marées pourraient jouer un rôle important dans l'apparition et le maintien du champ magnétique.

Comprendre comment les couplages entre la dynamique interne et les enveloppes externes contrôlent l'évolution de la Terre et des autres planètes est un grand enjeu du futur. En particulier, quantifier ces interactions dans des contextes planétaires autres que celui de la Terre est crucial pour évaluer les conditions d'habitabilité. Forte de sa connaissance approfondie du système Terre, notre communauté joue un rôle majeur dans ce défi, en proposant

des modélisations numériques et des mesures expérimentales de dernière génération.

III. Exobiologie, habitabilité des planètes et origine du vivant

L'origine de la vie, question interdisciplinaire par excellence, est devenue une thématique à part entière en Sciences de la Terre et de l'Univers avec la recherche de traces de vie (bio-signatures) terrestres et extraterrestres. La géo-microbiologie est une nouvelle discipline à la croisée de la minéralogie, géochimie et microbiologie, englobant de nombreuses thématiques: cosmo-biochimie, exobiologie et microbiologie archéenne. L'implication française sur les missions spatiales *in situ* (ex: Rosetta sur la comète 67P/Churyuov_Gerasimenko), les missions de retour d'échantillons cométaires et interstellaires (ex: Genesis Stardust), et dans l'étude de la matière organique extra-terrestre (chondrites carbonées et micrométéorites) a permis de mieux appréhender la diversité des précurseurs prébiotiques.

Sur Mars, les recherches actuelles ont montré qu'elle a été habitable. L'implication française dans les missions spatiales en orbite (Mars express) et *in situ* (Curiosity, MSL) a contribué à faire évoluer le paradigme *'follow the water'* vers celui de *'follow the carbon'*. Sur les lunes glacées, la communauté française a joué un rôle majeur dans la découverte d'océans profonds, et prépare la future vague d'explorations qui testeront leur potentiel exobiologique.

Sur Terre, l'identification de biosignatures dans les roches archéennes, implique aussi l'étude d'analogues actuels des procaryotes primitifs en milieux extrêmes (salinité, température, PH, etc.), sous-marins (EMSO, Nau-telle), lacustres (lacs Pavin, Tanganika) ou

souterrains, ainsi que par l'expérimentation géo-microbiologique, le développement de nouveaux traceurs et l'utilisation des rayonnements synchrotron.

Grandes questions

D'une façon générale, comment distinguer les paramètres physiques des empreintes réellement biologiques, et comment démontrer la biogénicité sur des bases plurielles (morphologie, composition moléculaire et isotopique)?

Plus spécifiquement :

– Quelles sont les sources de matière organique primitive terrestre et extra-terrestre?

– Quelles sont les conditions limites de l'habitabilité?

– Quelles traces de vie est-on susceptible de trouver sur Mars et sur les satellites glacés?

– Comment préserver ces traces de vie après des milliards d'années, d'irradiation, de métamorphisme et d'altération?

– Quelles sont les plus anciennes traces de vie microbiennes dans les roches terrestres? Où et dans quel type d'environnement (hydrothermal, marin peu profond, continental, souterrain) se sont-elles développées?

– Quelle est la base métabolique de ce vivant, son impact sur l'environnement? Il s'agit de savoir comment le vivant a pu influencer l'évolution de la planète, comment le repérer à travers les transformations qu'il a induites.

Prospective

L'objectif le plus consensuel aujourd'hui reste la recherche de biosignatures dans des roches anciennes archéennes terrestres et roches extraterrestres via le retour d'échantillons. Plusieurs observables clés, telles que la caractérisation de matière organique non

dégradée, devraient être permises par l'étude d'échantillons d'astéroïdes et de Mars.

Les thèmes d'habitabilité et de planétologie comparée demandent à être approfondis en prenant en compte le caractère extrême (les lunes de glace et Mars) des conditions physiques au regard du référentiel terrestre.

Le thème de biosignature doit lui aussi évoluer en prenant en compte la diversité des métabolismes connus et leur évolution au cours des temps géologiques, et s'enrichir des contraintes données par la microbiologie, la chimie prébiotique et la biophysique. Un effort devra être fait sur la caractérisation des modifications minéralogiques et géochimiques que le vivant exerce sur son environnement minéral proche. L'approche expérimentale ainsi que l'exploration d'environnements modèles trouvent ici tout leur intérêt.

IV. Relief, érosion et routage sédimentaire

Durant les années 90, la communauté des Sciences de la Terre s'est réapproprié l'étude des reliefs de la Terre et des processus d'érosion associés. De nouveaux concepts, concernant notamment l'effet sur les cycles biogéochimiques de l'érosion d'une chaîne de montagnes, la mesure et la modélisation de la dénudation, le transport gravitaire profond ou la modélisation analogique et numérique du couple érosion/sédimentation, ont été introduits.

La notion de **topographie à l'équilibre**, très discutée, reste peu illustrée par des données naturelles. Le défi actuel est de quantifier les paramètres morphologiques des reliefs et les vitesses/bilans d'érosion associée en confrontant temps courts et longs, petits et grands bassins versants.

Comment améliorer les lois d'érosion et de transferts des sédiments sur les

temps longs ? Les principaux défis concernent (1) l'érosion chimique, en y intégrant notamment le rôle des micro-organismes et en comprenant les relations entre érosions chimique et physique dans des contextes tectoniques et climatiques différents, (2) l'érosion glaciaire, (3) l'érosion éolienne, ou encore (4) l'érosion sous-marine.

Évolution du routage sédimentaire dans le temps. Il s'agit de quantifier et de prédire la réponse du système érosion-transfert-sédimentation à des sollicitations tectoniques et climatiques au travers (1) d'une mesure des bilans érosion-sédimentation sur des systèmes complets (actuel, ancien) et (2) le développement de modèles numériques couplés incluant érosion-transfert-sédimentation des bassins versants aux dépôts ultimes sur la croûte océanique.

Ces approches intégrées ont pour objectifs de quantifier les **temps caractéristiques de réponse** de l'érosion à un forçage tectonique ou climatique ou celle des temps de transfert des sédiments (comme par exemple le rôle tampon des bassins versants ou les transferts latéraux dus à la circulation océanique).

La réponse de l'érosion et du routage sédimentaire aux **forçages brefs** est une question majeure, après deux décennies focalisées sur les interactions déformations, climats, reliefs sur les temps longs. À l'échelle du *cycle sismique*, la contribution (positive ou négative) des séismes à l'érosion des reliefs, intégrant le temps de transfert post-sismique des sédiments des pentes vers l'exutoire et, en retour, la modification de l'état de contraintes sur les failles actives du fait des transferts de masses en surface (érosion, sédimentation), sont des thèmes de recherche émergents. Concernant le climat, les effets des *événements hyperthermaux* sont à établir, avec la question de l'importance relative de l'eustatisme, des flux terrigènes (érosion) et de la production de sédiments.

Le rôle de l'**érosion dans les cycles biogéochimiques** demeure énigmatique. Une des inconnues concerne le *bilan du carbone*

enfoui dans les sédiments, y compris dans les systèmes subactuels. La mesure (directe ou par proxys) du carbone enfoui et la compréhension des mécanismes régulant cet enfouissement devraient éclairer cette question.

Les chaînes de montagne et les reliefs anorogéniques (70% des reliefs terrestres) partagent en commun une forme de relief mal connue, les **surfaces d'aplanissement**. Quel est leur mode de formation? Sont-ils signifiants comme marqueurs du déplacement vertical d'origine tectonique, en particulier, dans les chaînes de montagne? Au-delà de ces objets, c'est toute la question des processus et des contrôles (notamment par la dynamique du manteau) des reliefs anorogéniques qui est posée.

D'un point de vue méthodologique, la quantification des **paléoaltitudes** reste en suspens : les approches paléobotaniques et isotopiques doivent encore faire l'objet de développements et être intercalibrées. La mesure de la dénudation a beaucoup progressé (traces de fission, U-Th/He, isotopes cosmogéniques, OSL), mais la prise en compte de la complexité passe par une compréhension des processus élémentaires (diffusion intra- et inter-granulaire, interactions dans un système hétérogène...).

V. Dynamique des climats et écosystèmes anciens

L'étude des climats et des environnements anciens nous renseigne sur le fonctionnement et les perturbations des enveloppes superficielles du système Terre. Leur archivage dans les couvertures sédimentaires océaniques et continentales permet d'explorer les impacts et les rétroactions des forçages biologiques, climatiques et géodynamiques au cours des temps géologiques. Si l'étude des crises et

transitions est fondamentale et abordée de longue date par la section 18, la compréhension de la stabilité du système Terre devrait l'être tout autant.

Le développement de chronomètres, de traceurs environnementaux (salinité, état redox, température...), la reconstruction des conditions physiques (bathymétrie, volume des océans et des calottes glaciaires...) et l'acquisition de données de terrain (à terre et en mer) nous semblent essentiels pour mieux appréhender la répétabilité des crises, les transitions et la stabilité du système Terre, en partant de questions fondamentales comme :

Comment reconstruire les impacts des processus géologiques et leurs rétroactions sur le climat et l'environnement dans les temps anciens? Ces processus sont, entre autres, les variations orbitales, l'altération continentale et les reliefs, la circulation océanique et la pompe biologique, l'hydrothermalisme, le volcanisme et le dégazage de la Terre...

Comment caractériser les événements extrêmes passés? Comment distinguer les perturbations des transitions climatiques? Il s'agit ici, notamment, d'étudier les hyperthermaux, la dynamique de la cryosphère et de l'hydrosphère, et les périodes de type *greenhouse* et *icehouse*. La comparaison de ces événements et de leurs enregistrements géologiques, à différentes périodes du Phanérozoïque mais également au Précambrien, est à envisager.

Comment connecter la dynamique de la paléobiosphère avec l'évolution des climats et environnements anciens? Cette question concerne les liens réciproques entre les processus géologiques sous-jacents aux variations environnementales, les climats et l'évolution des écosystèmes, pendant les périodes de stabilité et de perturbations. Le socle fondamental concerne les études de la composition et de l'évolution de la biosphère ainsi que celles du fonctionnement des écosystèmes dans le passé.

Comment relier les études sur les analogues actuels à celles des environnements anciens? Les biais associés aux fonctions de transfert entre la colonne d'eau, les organismes et les sédiments, et leur application aux sédiments anciens doivent être mieux contraints. Les travaux aux temps modernes compléteront le développement des traceurs géochimiques/isotopiques et l'instrumentation in-situ.

Comment optimiser les couplages données – modèles et intégrer la complexité biologique et géochimique dans les modèles couplés océan/atmosphère? Des efforts seront à mener, entre autres, sur l'intégration de processus hétérogènes, de données spatialisées, des masses d'eau continentale, de la végétation et de la (micro-)biosphère dans les modèles.

L'hétérogénéité des types de données et de leur distribution spatio-temporelle devra être pleinement intégrée pour évoluer d'une vision multi-1D à une vision 4D nécessaire à la compréhension de l'évolution du système Terre. L'élaboration de bases de données mutualisées et évolutives nécessitera des innovations mais sera essentielle pour évoluer vers une paléogéographie interactive et intégrative. Un effort important devra être poursuivi sur la datation des événements en maintenant les outils stratigraphiques et sur les caractérisations paléoenvironnementales par l'amélioration des outils naturalistes, analytiques et numériques.

Le défi majeur de ces futures années sera de conduire des démarches intégratives en combinant les approches mentionnées. Des interactions constructives entre les différentes communautés faciliteront l'intégration de données disparates et spatialisées dans les modèles numériques. Les explorations des couplages des processus biotiques et abiotiques, de la confrontation de leurs échelles de temps spécifiques induiront la caractérisation objective de la dynamique des environnements, climats et écosystèmes dans les temps anciens.

VI. Comment l'intérieur de la Terre contrôle-t-il les conditions de surface?

– Quel est le rôle des interactions entre manteau et réservoirs superficiels dans la genèse de la croûte continentale et dans l'établissement et le maintien des conditions habitables de surface ?

– Comment mieux intégrer les données géophysiques, géochimiques et de la pétrologie expérimentale dans la modélisation de la dynamique de la Terre interne ?

– Comment se maintient le bouclier magnétique garant de la préservation de l'atmosphère et de l'habitabilité de notre planète ?

La Terre archéenne hostile

Après l'impact lunaire, la cristallisation de l'océan magmatique a laissé une Terre très chaude à toutes profondeurs, au moins 300 degrés au-dessus du géotherme actuel. La dynamique interne au cours de l'Archéen reste méconnue, alors qu'elle reste déterminante même pour l'état actuel de notre planète. Par exemple, le champ magnétique s'est établi rapidement, mais les causes primaires de son établissement et de son maintien jusqu'à aujourd'hui restent controversées.

La vie s'est développée dès l'Archéen, malgré une atmosphère anoxique dominée par le CO₂. Des procaryotes ont évolué à travers des révolutions paléo-environnementales largement inconnues. Quelle était la dynamique de la lithosphère durant l'Archéen? Alors que des traceurs géochimiques démontrent la préservation de réservoirs mantelliques distincts et que les komatiites témoignent de la

fusion du manteau archéen profond, comment sont nés les premiers continents?

De l'archéen au protérozoïque : La grande transition

La Terre entière subit des mutations majeures il y a environ 2.5 Ga, marquées par la grande oxygénation de son atmosphère, point de départ du développement exceptionnel de la biosphère qui mènera progressivement aux eucaryotes multicellulaires. À la même période, l'établissement progressif de la tectonique des plaques associée se fait suite à un changement de dynamique du manteau. Comment la fusion partielle du manteau aux dorsales océaniques, le recyclage dans les zones de subduction, l'établissement du cycle interne des éléments volatils (en particulier du carbone et de l'hydrogène), la croissance continentale et l'orogénèse, ont-ils contribué à cette grande transition?

Par exemple, les mécanismes de croissance et de destruction des continents restent très discutés. Se situent-ils principalement dans les zones de subduction ou bien à la base de la croûte dans les contextes collisionnels ou intra-plaques?

De même, comment la dynamique mantellique influence-t-elle le champ magnétique et sa stabilité? Quel est l'âge de la graine et quel impact cela a-t-il sur le champ magnétique? Y a-t-il ou y a-t-il eu des couches stratifiées à l'intérieur du noyau liquide? Si oui, quels sont les alliages qui les constituent? De fait, le maintien de la géodynamo jusqu'à aujourd'hui reste une énigme.

La Terre moderne

Bien plus récemment, la dislocation de la Pangée (– 200 Ma) a créé l'environnement tectonique global moderne. L'observation de la

Terre actuelle par des méthodes géophysiques et géodésiques, couplée à des contraintes apportées par la pétrologie expérimentale et la géochimie permet de développer des modèles de convection qui permettent d'apprécier le rôle du manteau dans le fonctionnement actuel de la surface. Par exemple, le lien entre l'évolution géodynamique, la topographie dynamique et l'évolution du vivant, durant le Phanérozoïque y compris au Quaternaire, est un domaine très actif.

La prise en compte des processus métamorphiques, hydrothermaux et volcaniques dans tous les contextes tectoniques (zones de subduction, lithosphère océanique, zones de collision et domaines intraplaques), contraints par l'expérimentation en laboratoire, rend possible la modélisation des cycles des éléments volatils (carbone, oxygène, soufre, etc.) et complète ainsi notre connaissance des liens fondamentaux entre cycles internes, cycles externes et les relations entre monde minéral et monde organique.

VII. Déformation et aléas telluriques

L'étude des déformations lithosphériques et des aléas telluriques (séismes, éruptions volcaniques, glissements gravitaires et tsunamis) repose sur des enjeux à la fois fondamentaux, sociétaux et économiques. Observer, expérimenter et modéliser constituent un triptyque classique mais nécessaire à la compréhension de ces processus pour prédire leur évolution. L'ingénierie instrumentale de plus en plus précise et l'afflux de données massives issues de nos observations poussent notre communauté à remettre en cause les concepts classiques et à intégrer des développements nouveaux comme l'intelligence artificielle afin de relever des défis de demain et conduire nos territoires à être plus résilients face à ces aléas naturels.

1. Déformation lithosphérique : vers une rhéologie augmentée

Depuis plusieurs décennies, un des défis en Sciences de la Terre est la compréhension unifiée de la déformation de la lithosphère à court, moyen et long terme. Les hautes résolutions spatiales et temporelles des données géologiques, géophysiques et géochimiques actuelles nous amènent à changer de paradigme et à questionner les mécanismes de la déformation active. En effet, la déformation de la lithosphère et aux interfaces des plaques (notamment intersismique) apparaît comme une succession de phénomènes transitoires illustrés notamment par les séismes et glissements lents, les tremors non-volcaniques, etc. On observe aujourd'hui un spectre complet depuis le glissement continu jusqu'aux grands séismes. Les déformations transitoires sont actuellement envisagées comme contrôlées par le chargement tectonique, les injections de fluide, les transformations de la roche et leur cinétique – et de ce fait les changements de résistance, de volume et de contraintes associés. Un des défis actuels est de **relier les signaux géophysiques à des observations géologiques** (pétrologiques, géochimiques, structurales notamment) des zones déformées fossiles et exhumées (zones de cisaillement cassant et/ou ductile).

L'expérimentation en laboratoire vient enrichir cette approche en caractérisant l'impact des transformations minéralogiques, des changements de phase et de la fusion partielle sur la rhéologie. Ceci afin de mieux appréhender les processus responsables de la localisation de la déformation sur les temps longs mais aussi ceux à l'origine des signaux transitoires. Ces nouvelles données naturelles et expérimentales permettront d'alimenter et de calibrer des **modèles thermo-mécaniques avec des lois rhéologiques réalistes** (fluage et friction).

Actuellement, grâce à l'essor sans précédent des moyens de calcul, les modèles thermo-mécaniques permettent la modélisation de la déformation long-terme de la lithosphère à très haute résolution spatiale, en 3D et

en prenant en compte les couplages entre processus superficiels et profonds. Par ailleurs, si les modèles de cycle sismique actuels reproduisent de manière satisfaisante les données dont nous disposons sur les déformations co-, inter- et post-sismiques, une nouvelle génération de modèles (qui commence à voir le jour) prendra en compte de manière plus réaliste la rhéologie de la lithosphère (et son évolution sur le court et le long-terme) par le biais des nouvelles lois de friction et de fluage. Ces développements récents montrent que l'étude et la modélisation globale de la déformation de la lithosphère à l'échelle du cycle sismique sera possible, tout en intégrant la déformation à plus grande échelle de temps et d'espace.

2. Volcanologie : rôle du couplage profond-surface sur la dynamique éruptive

En volcanologie, l'objectif est de comprendre les processus profonds (transferts de masse, conditions de stockage des magmas, cristallisation, dégazage) responsables des différents dynamismes éruptifs observés en surface, et de **proposer des modèles prédictifs aidant à la gestion des crises volcaniques**. Les questionnements scientifiques restent nombreux : mécanismes et échelles de temps des processus (ex remplissage et vidange des réservoirs), détection de signaux pré-éruptifs, rôle du système hydrothermal, relations tectonique-sismique-volcanisme, lien avec les ressources minérales et géothermie, influence des volcans sur le climat, etc. Pour que les collectivités territoriales s'emparent pleinement des modèles prédictifs, l'analyse de l'aléa volcanique doit maintenant intégrer les risques associés tels que **les déstabilisations de flanc et les tsunamis**, ce qui requiert une évolution vers une stratégie multidisciplinaire (i.e. une imagerie fonctionnelle associant géophysique et géochimie des magmas, fluides et gaz).

Les éléments de réponse passeront par des développements (i) techniques des méthodes géophysiques permettant de repousser les limites actuelles des résolutions spatiales et temporelles et, de fait, une imagerie plus fine des structures profondes du système magmatique, (ii) analytiques, donnant accès à des résolutions chimiques et géochronologiques traçant des évolutions extrêmement fines des processus, (iii) expérimentaux en laboratoire simulant de manière de plus en plus réaliste (en pression, température, décompression ou déformation) la dynamique des processus pré- et syn-éruptifs, et (iv) une démarche résolument interdisciplinaire (sismologie, géodynamique, métallogénie, climatologie, etc.).

3. Instabilités gravitaires : vers des modèles intégratifs des données de terrain et de laboratoire

L'un des défis majeurs de l'étude des instabilités gravitaires réside dans l'établissement de lois rhéologiques d'endommagement, de rupture et de lois de transport des masses impliquées. Chacune doit prendre en compte la diversité et la complexité naturelles du système instable (interface terre-atmosphère ou terre-mer). D'autres paramètres doivent également être pris en compte, tels que les effets de sollicitations sismiques, volcaniques et/ou climatiques, la fragmentation du milieu, les effets thermiques, ou encore le rôle des fluides dans la rupture, l'écoulement, l'érosion/dépôt, l'hétérogénéité des matériaux et le temps.

À titre d'exemple, si des relations de causalité ont été décrites à terre et en mer entre l'action d'un fort séisme ou la circulation de fluides et le déclenchement de glissements de terrain, le rôle de ces sollicitations externes sur la dégradation des matériaux géologiques reste à définir. La communauté doit (i) poursuivre les actions de surveillance de sites par

la mesure des paramètres environnementaux (pression interstitielle, nature des fluides, accélération d'un sol...), de suivi par mesures récurrentes (photogrammétrie, satellite, etc.), de manière à détecter les facteurs déclencheurs du glissement et son évolution; (ii) utiliser les séries long-terme afin d'identifier des signaux précurseurs, (iii) améliorer les modèles de rupture et d'écoulement pour une meilleure prédiction des évènements, grâce au développement de réseaux de mesures (géophysiques, géologiques et hydrologiques) et d'expérimentation en laboratoire.

4. *Big Data* : le défi de l'intelligence artificielle

Les deux dernières décennies ont vu apparaître au niveau mondial de nouvelles capacités d'observation et de mesures soutenues par le développement de réseaux denses au sol, en mer et dans l'espace. Il en découle un afflux de données massives avec une continuité en temps et en espace. La qualité des observables a suivi cette progression et permet d'affiner les modèles développés pour mieux appréhender les processus de déformation, les signaux transitoires et précurseurs des évènements.

L'enjeu de la prochaine décennie est donc de faire face aux défis proposés dans le domaine des '*Big Data*' tout en améliorant la précision des réseaux d'observation et en conservant les questionnements scientifiques propres aux Sciences de la Terre.

Au niveau des observations, les réseaux multi-observables peuvent évoluer par l'amélioration des précisions notamment en géodésie avec des déplacements submillimétriques ou en sismologie sur les variations relatives de vitesse de l'ordre de 10^{-5} ; mais aussi en milieu extrême par l'apparition de technologies innovantes utilisant par exemple la fibre optique sur les volcans à terre ou en mer avec l'apparition d'observatoires sous-marins sur le

long terme, proches des failles majeures générant des grands séismes potentiellement tsunamigéniques.

Deux tendances se distinguent et se complètent dans l'utilisation des *Big data*. D'un côté, le traitement massif de données (spatiales et temporelles) permet de réduire la variance sur les observables et, par là même, d'améliorer l'identification des marqueurs de la déformation. Ce travail interdisciplinaire nécessite des efforts importants et continus en particulier dans l'inversion jointe ou combinée de données de diverses natures (par exemple sismologique, géodésique, électromagnétique), chacune d'elles apportant une information, une résolution et une précision différentes sur les processus étudiés.

De l'autre, l'intelligence artificielle nous démontre que des techniques d'apprentissage permettent de détecter des précurseurs là où les analyses précédentes ne voyaient que du bruit. La création récente en France d'un réseau composé de quatre Instituts Interdisciplinaires d'Intelligence Artificielle (3IA) montre clairement que la communauté des géosciences doit se mobiliser autour de cette question interdisciplinaire pour apporter de nouvelles approches et relever de nouveaux défis. Nous n'en sommes qu'aux prémices mais nul doute que le développement de l'IA sera la prochaine révolution dans notre domaine.

Que ce soit via le traitement massif de données ou l'intelligence artificielle, l'enjeu principal est de permettre d'accéder à la fois à la donnée et aux moyens de traitement mis en jeu via des portails dédiés et des espaces de stockage au sein des infrastructures nationales. L'étape suivante est l'adaptation des plateformes de calcul actuelles permettant le partage open source de codes évolutifs. Ces objectifs rejoignent de près ou de loin les travaux démarrés depuis quelques années dans le domaine de la science ouverte avec comme défi de rendre accessible au plus grand nombre les produits dérivés des données.

IX. Apport des sciences de la Terre dans la transition énergétique et écologique

Les Sciences de la Terre ont connu une accélération dans la première moitié du XIX^e siècle avec la révolution industrielle pour la recherche du charbon, puis dès le début du XX^e siècle, pour celle du pétrole et du gaz. La consommation intensive (et excessive) de ces ressources énergétiques ont gravement endommagé l'environnement terrestre avec une augmentation du CO₂ atmosphérique ayant pour conséquence un réchauffement climatique rapide et unique dans l'histoire de la Terre. Les Sciences de la Terre ont donc été actrices du changement climatique mais se retrouvent impliquées maintenant dans la remédiation de ces effets (compréhension du cycle du CO₂, stockage géologique du CO₂, etc.). Le futur énergétique de l'humanité passe par une diminution drastique des énergies carbonées employées au profit d'énergies renouvelables, les biocarburants et essentiellement l'électricité produites par diverses sources (éolien, solaire, énergie des vagues et marées, géothermie, mais aussi nucléaire, même si cette dernière pose des questions sociétales importantes). Le développement de l'humanité (une dizaine de milliards d'habitants en 2050 pour 7,6 milliards en 2020) requiert également l'utilisation d'autres ressources géologiques, comme (i) les métaux critiques dont notamment les Terres Rares (même si l'augmentation des capacités de recyclage devrait amoindrir cette nécessité) et (ii) les matériaux de construction, notamment le sable qui fait actuellement crucialement défaut dans des régions en fort développement.

Les contributions des Sciences de la Terre à cette transition énergétique vers un monde au développement durable doivent être multiples et les meilleures équipes du CNRS doivent s'emparer de ces questions à haut potentiel de recherche fondamentale et à fortes applica-

tions sociétales. Nous présentons ici 4 défis parmi de nombreux autres.

L'imagerie 3D à haute résolution des croûtes continentale et océanique (tomographie électrique, bruit sismique) pour la localisation des porteurs de métaux (dont les Terres Rares) et des ressources en matériaux de construction.

La prédiction de la localisation des sédiments et le dimensionnement des hétérogénéités associées (au niveau des réservoirs/aquifères et couvertures/aquitards) afin de pouvoir construire des modèles pour le stockage géologique des énergies renouvelables ou du CO₂, la recherche de nouveaux types de gisement de sable.

La description pétrophysique et géomécanique des structures de porosité et des interactions fluides-roches (eau, air, H₂, CO₂) pour décrire, comprendre et modéliser la distribution et les circulations des fluides profonds, pour une gestion durable des aquifères profonds, l'exploitation des ressources géothermiques ou modéliser la mobilité d'éléments tels que le lithium ou l'uranium.

L'étude et la compréhension des interactions minéral-vivant pour identifier les rôles joués par la biosphère profonde dans la croûte océanique ou continentale, par les interactions bactéries-fluides roches dans la diagenèse et la métallogénèse, ou pour leur utilisation dans les procédés de remédiations des sites industriels ou miniers.

Pour répondre aux questions et aux défis posés, il sera indispensable de développer les interactions avec les sciences économiques et sociales pour l'estimation des besoins futurs et la modélisation des réserves, et avec les sciences chimiques et de l'ingénieur pour améliorer les procédés de développement industriel pour aller au-delà des ressources minérales et prendre en compte aussi les ressources énergétiques, la durabilité ou le recyclage des matériaux.

Conclusion

La Terre et, plus globalement, les planètes telluriques sont sources de questionnements scientifiques fondamentaux. Ces questions ont évolué avec le temps (l'âge de la Terre et la tectonique des plaques sont aujourd'hui bien établis) mais de nombreuses interrogations demeurent sur le fonctionnement de notre planète et son histoire. La section 18 en a sélectionné et documenté brièvement quelques-unes, qui nous sont apparues d'actualité via le travail des chercheurs que nous avons pu évaluer, promouvoir ou recruter. Nos questions couvrent l'ensemble du spectre de la connaissance, du savoir le plus fondamental sur la formation et le fonctionnement des planètes telluriques jusqu'aux applications sociétales comme le risque et l'exploitation des géoressources. Les approches diverses s'étendent des théories abstraites jusqu'au savoir-faire technologique de l'instrumentation, ou du prélèvement d'échantillons en milieu

extrême au repérage de traces infimes témoignant de l'histoire des planètes. Ces continuums sont consubstantiels de la recherche que nous menons. C'est bien l'objet « planète » qui fonde notre unité scientifique, et notre recherche est par nature pluridisciplinaire et multi-échelles. La complexité des problèmes, la diversité des approches et le mode de financement de la recherche, nous amènent de plus en plus à travailler de manière structurée et collaborative, localement, nationalement et internationalement. Dans cet esprit, on peut citer l'effort international sur le partage des données géophysiques, la structuration nationale des outils et équipements en géochimie, le pilotage et l'exploitation des missions spatiales.

Comprendre au mieux le monde qui nous entoure et son histoire pour nous y adapter, connaître les conditions qui ont permis l'émergence et l'évolution de la vie ; savoir où nous habitons et anticiper les autres mondes où nous pourrions habiter... voilà nos moteurs de recherche, voilà la quête du géologue moderne.

Note

(1) Les chiffres datent de décembre 2018.

SECTION 19

SYSTÈME TERRE : ENVELOPPES SUPERFICIELLES

Composition de la section

François LOTT (président de section), Isabelle CHIAPELLO, (secrétaire scientifique), Gwénaél BERTHET, Laurent BOPP, Agnès BORBON, Dominique BOUNIOL, Malik CHAMI, Nicole COLLAS, Boris DEWITTE, Thierry CORREGE, Thierry FOUCHET, Jonathan GULA, Annie HUYGHE, Myriam KHODRI, Benoit LAURENT, Olivier MAGAND, Anne MONOD, Frédéric PAROL, Sophie RABOUILLE, Géraldine SARTHOU, Joël SAVARINO, Alexei SENTCHEV, Kazuyo TACHIKAWA.

Résumé

Nos recherches ont montré que le changement climatique s'était accéléré au cours des 10 dernières années de façon très significative, et que les séries temporelles issues d'observations modernes (1979-aujourd'hui) sont souvent trop courtes pour nous permettre de bien comprendre certains mécanismes fondamentaux contrôlant ce changement. Les mesures et les études fondamentales se sont intensifiées, leurs précisions compensent en partie cette faible profondeur temporelle mais révèlent aussi de nouvelles formes de pollution, de nouveaux mécanismes. Malgré ces défis scientifiques, la demande sociétale en termes d'explications, de prévisions locales et de stratégies d'adaptations a dicté de plus en plus l'agenda de nos recherches. Nous avons aussi

été de plus en plus sollicités pour surveiller les changements environnementaux. Si on ajoute à cette demande sociétale et à ce besoin de surveillance, le développement de modèles de plus en plus complexes ou le partage et la mise en réseau des résultats de nos modèles et de nos observations, l'accroissement des efforts demandés aux chercheurs de notre section ne s'est pas traduit, au cours des dernières années, par un accroissement des moyens humains à la mesure des enjeux. Il nous semble pourtant que renforcer les thèmes portés par la Section 19 est une opportunité pour le CNRS : nos domaines souffrent aussi d'un déficit d'enseignants-chercheurs à l'université et dans les grandes écoles, déficit lié au fait que les sciences de l'environnement ont encore peu de débouchées dans l'industrie et les services ; elles sont aussi encore trop peu

enseignées à tous les niveaux académiques. Si élargir la base de recrutement dans notre section est nécessaire pour répondre à ces défis, on peut aussi souligner que certaines de nos questions les plus fondamentales relèvent de « disciplines » (physique, chimie, biologie, biogéochimie, mathématiques appliquées...). On pourrait donc envisager que nos sections « disciplinaires » s'ouvrent plus aux questions environnementales, et/ou que des sections interdisciplinaires dédiées aux questions climatiques, ce qui inclue la qualité de l'air et des océans, soient plus orientées vers ces disciplines fondamentales. Enfin, nos activités de surveillance nécessiteraient de recruter plus d'« astronomes » dans les services nationaux d'observation mis en place par l'INSU dans les domaines de l'environnement.

Mots clés :

Système climatique : couplages entre océan, atmosphère, continent, cryosphère et biosphère – Changement global, régional, anthropisation, impacts – Cycles biogéochimiques et dynamiques des écosystèmes marins – Physique, dynamique, chimie et biologie des domaines océanique et côtier – Physique, dynamique et chimie de l'atmosphère et de la cryosphère – Paléo-environnements : archives océaniques, glaciaires, continentales – Planétologie : physique, dynamique et chimie des atmosphères planétaires – Techniques expérimentales (in situ, à distance) d'intérêt atmosphérique ou océanique – Modélisation appliquée des fluides géophysiques.

Introduction

Les recherches développées dans la section 19 recouvrent de nombreuses préoccupations sociétales telles que les prévisions météorologiques, l'océanographie opérationnelle, la qualité de l'air et de l'eau, la reconstruction de la couche d'ozone, la prévision des extrêmes météorologiques, le change-

ment climatique, ou l'acidification et la désoxygénation des océans.

Les chercheurs relevant de la section sont très actifs dans la mise en place des grands traités internationaux, la rédaction des rapports d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et du rapport d'évaluation de l'état de la couche d'ozone. Les efforts de communication vers le grand public sont devenus intenses et prennent des formes très diverses : ouvrages personnels, interviews, conférences « grand public », journées portes ouvertes, actions de médiations scientifiques (« train du climat ») et sciences participatives. Les chercheurs travaillent en étroite collaboration avec les autres grands organismes de recherche Français (Universités, IFREMER, Météo-France, CEA, CNES, IRSTEA, INRIA, IRD...) et internationaux (universités, CEPPMT, Mercator-Océan International, ESA, NASA). Ils ont des liens forts avec de nombreuses entreprises françaises, par exemple pour développer l'instrumentation, la télédétection spatiale, la prévision des pollutions atmosphériques ou les services climatiques. Ils développent des partenariats avec les collectivités locales et régionales dans le cadre de la prévision des aléas climatiques (inondations, risques glaciaires), et des pollutions.

Dans l'ensemble de ces interactions économiques et sociétales, les collaborations avec les chercheurs CNRS sont toujours appréciées car ils bénéficient de l'indépendance que leur permet leur statut. Cependant, ces sollicitations du milieu socio-économique ont une incidence certaine sur le temps alloué à la recherche fondamentale alors que de nombreuses questions scientifiques restent à élucider. Par exemple, les caractéristiques de l'écoulement basal des grands glaciers continentaux sont encore mal connues. Cet écoulement basal conditionnera la débâcle des glaces en Antarctique et au Groenland et la montée des eaux qui en découlera. L'organisation à grande échelle des nuages dans les tropiques demeure mal comprise alors qu'elle conditionne largement notre capacité à prédire les changements climatiques futurs. L'impact chimique des nouvelles énergies reste presque entièrement à évaluer, tout

autant que les cycles biogéochimiques dans un océan plus acide, plus chaud et désoxygéné.

I. Faits marquants

A. Physique de l'atmosphère et climat

La période 2014-2019 a été marquée par une succession d'événements extrêmes, dont certains tout à fait inattendus, comme le cyclone tropical Ophélie en septembre 2017 qui a fini son cycle de vie sur l'Irlande, ou les pluies cévenoles de l'automne 2018 dont l'amplitude a été exceptionnelle. Dans un climat qui se réchauffe, il est également probable que les événements extrêmes tels que l'événement El Niño dans le Pacifique équatorial observé en 2015-2016 et accompagné de précipitations tropicales particulièrement intenses vont augmenter.

Nos recherches montrent que ces événements météorologiques rares dépassent la variabilité naturelle du climat et sont attribuables aux activités anthropiques. Des dérives, telles que l'arrivée d'un été climatique plus précoce sont aussi clairement détectées. La période a également vu les efforts de la communauté récompensés en termes de prévision saisonnière. Cette prévisibilité peut concerner les moussons et provient des composantes « lentes » du système climatique (l'océan et les sols). Ainsi, la « pause » récente du réchauffement global est due à une absorption de l'énergie supplémentaire par les océans. Cette pause est aujourd'hui bien terminée !

Notre confiance dans les attributions du changement climatique et de sa prédictibilité est liée au développement de bases de données multi-modèles (CMIP), mais la période a aussi vu la maturation de simulations climatiques régionalisées (programme CORDEX). En

illustrant l'amplification régionale que peut avoir le changement climatique, ces recherches montrent qu'il reste encore de grandes incertitudes, sur les liens entre circulation atmosphérique et précipitations, ou sur le rôle des nuages et des aérosols.

B. Chimie atmosphérique et pollutions

La période a été marquée par la recrudescence d'événements extrêmes de pollution atmosphérique en Asie (Inde, Chine), mais également en Europe, en Amérique, en Afrique, en Arctique... L'ampleur de ces événements s'étend aux grandes échelles, induisant des impacts inédits sur la qualité de l'air et la santé (baisse de l'espérance de vie, millions de morts prématurés). Si une tendance à la baisse est observée sur la période dans certaines régions et pour plusieurs polluants primaires réglementés (SO₂, NO_x, PM₁₀), la communauté a vu émerger de nouvelles problématiques telles que celles de l'aérosol organique secondaire et des particules fines.

L'étude de la qualité de l'air intérieur bénéficie des approches et expertises mises en place pour l'atmosphère extérieure, tout en se démarquant par la spécificité du milieu (confinement, effets des parois, sources spécifiques...). Par ailleurs, la question de la contribution à la pollution extérieure des émissions liées aux activités domestiques et tertiaires commence à être posée.

Les observations de la chimie atmosphérique en régions polaires (Antarctique essentiellement) ont mis en évidence des mécanismes inédits de réactivité à l'interface glace de mer / calotte polaire Antarctique / atmosphère pendant l'hiver impliquant l'ozone, le mercure, le nitrate et les halogènes.

Enfin, pour la stratosphère, l'analyse des séries temporelles issues des observations spatiales, sol et ballons (notamment dans le cadre du réseau NDACC) a permis de mettre en évi-

dence les signes d'un début de reconstruction de la couche d'ozone stratosphérique.

C. Océanographie Physique

L'accès à des observations de plus en plus nombreuses, avec des résolutions de plus en plus fines, et l'augmentation de la puissance de calcul des modèles numériques ont permis d'étudier l'impact des fines échelles océaniques sur la dynamique de surface, de montrer qu'elles jouent un rôle de premier ordre sur les flux verticaux de chaleur et de traceurs biogéochimiques (oxygène et carbone) et qu'elles contribuent ainsi à la structuration des écosystèmes.

L'amélioration de la qualité des observations globales de l'océan profond, a permis de montrer que la circulation abyssale inter-hémisphérique était en grande partie contrôlée par les échanges de chaleur (géothermiques) et de quantité de mouvement (via la turbulence et les ondes de gravité) se produisant sur les fonds marins. L'amélioration des modèles océanographiques et des techniques d'assimilation de données associées montrent une grande sensibilité potentielle des circulations profondes aux modifications en cours de la couverture en glace de l'Arctique.

D. Biogéochimie Marine

Le nombre croissant d'études couplant des approches de biologie moléculaire, de biogéochimie et d'écophysiologie, a permis d'avoir une vision nouvelle du rôle des communautés planctoniques dans la pompe biologique de carbone et les flux de matière dans l'océan.

La période a été marquée par la très forte implication de la communauté française dans des grands programmes internationaux (BGC-ARGO, GEOTRACES, IMBeR ou SOLAS). Ils ont permis une meilleure caractérisation de la phénologie du phytoplancton et une meilleure

compréhension des cycles biogéochimiques des éléments traces et des isotopes dans l'océan.

La mise en orbite de nombreux capteurs satellitaires ces 5 dernières années a permis de cartographier de nouveaux groupes algaux phytoplanctoniques fonctionnels à l'échelle globale.

L'intégration de modèles biogéochimiques dans les modèles du système Terre développés par la communauté française, ainsi que le développement de modèles océaniques représentant l'ensemble de l'écosystème marin, du phytoplancton aux niveaux trophiques supérieurs, ont permis de mieux comprendre le rôle de l'écosystème dans les grands cycles biogéochimiques, et d'offrir les premières projections de l'impact du changement climatique sur l'ensemble de l'écosystème marin.

E. Glaciologie

Les études cartographiques récentes montrent l'accélération des vitesses d'écoulement des glaciers côtiers du continent Antarctique et du Groenland, conjuguée à une diminution de l'épaisseur de ces derniers. Ce processus est attribué au double effet du réchauffement des océans et de l'atmosphère. La période a aussi permis une meilleure appréciation des impacts du changement de la cryosphère en terme d'évolution du niveau des mers, ou de modification et de diminution de la ressource en eau.

L'impact du déclin de la banquise arctique sur le climat des moyennes latitudes est en cours d'évaluation. Ce changement majeur a poussé la communauté internationale à mettre en place une « Année de la Prédiction Polaire » (2017-2019).

La période est également marquée par une meilleure compréhension de la fonte du permafrost. Le pergélisol arctique, en dégelant, permet à l'activité bactérienne de métaboliser le carbone ancien, qui y est stocké depuis des millénaires. Les émissions de dioxyde de carbone et de méthane qui en découlent agissent à leur tour sur le climat.

F. Paléoclimats

La période a vu le renforcement des comparaisons modèles-données pour contraindre les modèles et permettre le développement d'outils numériques intégrant explicitement les proxies. Cela a permis d'étudier la variabilité climatique de faible amplitude et/ou de courte durée. Les recherches récentes révèlent ainsi l'importance du forçage volcanique durant les derniers millénaires. La circulation méridionale dans l'Atlantique Nord durant l'Holocène a été reconstituée et des scénarii possibles des changements observés ont été proposés. Ces résultats sont appuyés par des simulations plurimillénaires et dans le cadre de l'action internationale PAGES 2k qui synthétise les données de reconstitution. Enfin, on peut noter d'importants travaux en paléoclimatologie tropicale (zones de mousson, ENSO), qui font parfois le lien avec l'anthropologie.

G. Atmosphères planétaires

Le survol de Pluton par New Horizons a révélé une surface beaucoup plus active qu'attendu, sculptée par des événements récents de cryovolcanisme, d'activité glaciaire, et d'interaction surface-atmosphère. La modélisation du transport atmosphérique a permis d'expliquer la répartition géographique et topographique des glaces de N_2 , CO et CH_4 à la surface de la planète naine. La fin de la mission Cassini et la mission JUNO ont permis par des mesures gravimétriques inédites, d'établir la profondeur de la rotation différentielle de Jupiter et Saturne : au-delà de 3 000 km de profondeur pour Jupiter et 8 000 km pour Saturne, la rotation de la planète devient « solide » ou uniforme, une transition maintenant bien expliquée en termes de magnétohydrodynamique.

La mission ExoMars de l'ESA a récemment montré que la concentration du méthane dans l'atmosphère martienne est plus basse que

celle établie par les « détections » précédentes. Ce résultat est de nature à clore le débat sur la présence de méthane dans l'atmosphère martienne et ses implications sur une possible activité biologique.

II. Thèmes émergents

Une part significative des résultats majeurs de la période est due à une amélioration constante de la résolution des modèles de simulation de toutes les composantes du système climatique, ainsi qu'à une amélioration de la paramétrisation des processus physiques dans ces modèles. La précision et la résolution des données fournies par les sondeurs spatiaux, la réduction des coûts de mesures et d'analyse de données obtenues *in situ* ou en laboratoire, et l'élargissement du nombre de constituants chimiques et biogéochimiques mesurés ont également joué un rôle important.

Comme dans d'autres domaines scientifiques, cette révolution lente va se poursuivre : la miniaturisation des capteurs va permettre d'équiper les citoyens (mesures individuelles de pollution), mais aussi des mammifères (océanographie), des ballons, des drones. Des constellations de micro satellites vont peut-être aussi voir le jour. Ces avancées permettront d'échantillonner l'environnement à des échelles de plus en plus fines et vont fournir des masses de données considérables qu'il va falloir exploiter. L'ensemble de la communauté s'intéresse donc de plus en plus aux techniques d'intelligence artificielle, ou d'apprentissage profond.

A. Physique de l'atmosphère et climat

La courte période d'observation intense durant laquelle le système climatique est à

peu près stable (depuis le début de l'ère des satellites en 1979 jusqu'aux premières années du XXI^e siècle en 2005) fait que pour l'ensemble du système climatique, la période d'apprentissage des modèles statistiques est extrêmement courte. Invalidant en partie l'idée d'apprentissage profond en ce qui concerne le climat global, on s'oriente vers des pistes novatrices combinant statistiques traditionnelles, modélisations, observations *in situ*, observations satellites et archives naturelles. L'une de ces pistes consiste à mieux exploiter les boucles de rétroaction du cycle saisonnier et qui doivent se retrouver dans le changement climatique (notion de « contraintes émergentes »). Une autre piste consiste à sortir des techniques statistiques habituelles, où un modèle est fixe avec des conditions initiales et des scénarii de forçages variés et à proposer des « histoires » pour lesquelles des événements extrêmes du passé sont réactualisés dans le futur en faisant varier la formulation des modèles.

La période a vu la banalisation de techniques stochastiques pour améliorer la physique des modèles et la dispersion des ensembles de prévision climatique. Ce type d'approche est justifié par le fait que la résolution des modèles globaux devient proche de l'échelle des phénomènes que l'on cherche à paramétrer. On parle de « zone grise » et les interactions entre ces petites échelles et les échelles résolues restent au cœur des problématiques à venir. L'organisation de la convection atmosphérique le long de structures d'échelles planétaires comme les ondes équatoriales ou l'oscillation de Madden Julian dans les tropiques sont des exemples caractéristiques de structures grandes échelles mal prédites. La période voit ainsi l'émergence de modèles où toutes ces échelles sont résolues, ce qui permettra de reproduire ces organisations aux échelles planétaires.

La période a vu également l'émergence de missions spatiales opérationnelles (Metop-SG) ou de recherche (ADM-Aeolus, EartCare) combinant des outils innovants (imagerie, optique passive, active, polarisée, sondeur...) ainsi que la consolidation des réseaux sur le plan national et européen (ACTRIS).

B. Chimie de l'atmosphère

Le croisement des données physico-chimiques sur l'aérosol et la toxicologie améliore la quantification des impacts de la qualité de l'air sur la santé. Des projets émergents voient le jour sur la recherche de nouveaux indicateurs de toxicité et de sources, sur l'augmentation de la résolution temporelle des données aérosols, et sur la prévision à long terme des pollutions.

La transition énergétique et écologique en cours changera notablement les sources de polluants. On peut penser par exemple au passage du carbone à l'hydrogène pour les transports ou du fioul au feu de bois pour le chauffage. Ces changements de sources de polluants vont profondément modifier le réacteur chimique atmosphérique, voire impacter le climat. L'émergence de nouveaux matériaux et composés (nanoparticules, revêtements actifs des bâtiments, pharmacologie, etc.) et de nouveaux modes de vie et d'organisation vont être des éléments à considérer afin d'orienter les choix politiques.

Sur le thème des gaz à effet de serre (GES), les nouvelles techniques instrumentales (télé-détection sol et spatiale, drones) et celles moins récentes mais en constante amélioration (spectrométrie infrarouge *in situ*) vont permettre l'étude des tendances récentes et à plus fine échelle. On note le rôle croissant des missions spatiales à venir pour le CO₂ (MICROCARB, 2021) et le CH₄ (MERLIN, 2024), et l'extension des réseaux sol pour les gaz à effet de serre en général (ICOS).

C. Océanographie Physique

Les thématiques émergentes concernent souvent les interfaces (atmosphère, fonds océaniques, cryosphère et continents). Ainsi, les interactions aux fines échelles et à haute-fréquence qui vont impacter les couches limites atmosphériques et océaniques sont au

cœur de nombreux projets internationaux (ex : EUREC4A-ATOMIC). Un autre aspect important est la dynamique de l'océan profond, où les interactions des courants et des ondes océaniques avec la topographie génèrent le mélange à petite échelle qui contrôle la circulation thermohaline et les équilibres à grande échelle de l'océan. À l'interface de l'océan et de la cryosphère, les interactions entre la glace de mer, les vagues et la turbulence océanique représentent un effet important sur le système couplé. Le continuum qui va des zones estuariennes et côtières jusqu'à l'océan hauturier est une zone particulièrement sensible qui va être de plus en plus étudiée.

D. Biogéochimie Marine

La complexité et l'efficacité de la pompe biologique de carbone est maintenant abordée avec des approches nouvelles, combinant des outils innovants d'observations (haute fréquence, nouveaux capteurs autonomes optiques, acoustique, imagerie, etc.), et des techniques d'analyse de pointe. Ces approches permettent notamment de mieux comprendre et quantifier les processus de reminéralisation de la matière organique qui se produisent dans la zone mésopélagique, une zone clef encore mal caractérisée.

Ces dernières années, un rapprochement très novateur entre la biogéochimie marine, les sciences dites « Omics » (océanographie moléculaire) et la biodiversité fonctionnelle, a émergé et a abouti à des résultats particulièrement originaux, notamment concernant la pompe biologique de carbone, les flux de carbone et d'azote, les micro-organismes et la physiologie/écologie du plancton. La combinaison des études de biogéochimie, de microbiologie, d'écologie, de physiologie, de physique et de chimie est un des enjeux majeurs de notre communauté pour les années à venir.

La présence de polluants émergents, en particulier les plastiques, est une problématique environnementale cruciale pour les

océans et les écosystèmes marins. Une meilleure compréhension de leur devenir, que ce soit biogéochimique, physique ou écologique est absolument indispensable.

E. Glaciologie

Les progrès techniques en observation et en modélisation permettent d'intégrer toutes les composantes de la cryosphère (pergélisols, calottes polaires, glaciers, glace de mer, etc.) dans les modèles de climat. Les comportements transitoires de la cryosphère deviennent accessibles, et cela concernera même les paléoclimats. On s'oriente de plus en plus vers des prévisions de l'évolution future des glaciers, de la banquise et cela depuis les échéances courtes (jour-semaine) jusqu'aux prévisions interannuelles voir climatiques.

L'étude de la réactivité chimique atmosphérique dans les zones polaires anthropisées voit l'émergence progressive d'une thématique dédiée à la « qualité de l'air polaire » en lien avec les enregistrements des archives glaciaires et l'anthropisation de ces milieux.

F. Paléoclimats

On voit émerger des prévisions des périodes chaudes très anciennes (Miocène, Pliocène) qui pourraient constituer un analogue à notre futur. On commence aussi à faire des simulations de proxy et des essais d'assimilation de paléodonnées. La grande transition climatique du Mid-Pleistocene (1 200 à 700 ka) est une des cibles afin d'évaluer les processus de rétroaction interne. Elle est en accord avec le projet européen glaciologique Beyond EPICA Oldest Ice qui a l'objectif d'étendre l'enregistrement de la concentration en CO₂ atmosphérique à 1,5 Ma par forage de glace antarctique.

Par ailleurs, les études du climat des périodes chaudes (interglaciaires) et des événements

rapides du passé restent d'actualité. Sur ce dernier point, on note que la déconvolution des signaux interannuels et saisonniers devient possible par l'analyse individuelle de nombreux microfossiles.

G. Atmosphères planétaires

L'apparition d'instruments à haute résolution angulaire tels que SPHERE, va permettre d'obtenir d'excellents spectres dans l'infrarouge des exoplanètes, qui révèlent la présence d'eau, de CO, éventuellement de CO₂. En termes de modélisation, des simulations de plus en plus réalistes de la circulation générale des planètes géantes vont apparaître.

III. Forces, Faiblesses, Opportunités, et Menaces

Les questions relatives à l'emploi scientifique, l'attractivité des carrières de chercheur en France, la complexité du paysage scientifique, les moyens alloués pour la recherche, les limites de l'ANR, étant des problématiques communes à toutes les sections, elles sont traitées globalement dans le bilan et les propositions faites par la CPCN dans le cadre de la future loi de programmation de la recherche. Les représentants de la section souscrivent largement aux conclusions de ce document. Ces faiblesses seront peu reprises ici.

A. Forces

La section 19, regroupe une forte pluridisciplinarité en rassemblant océanographes, météorologues, glaciologues, physiciens et chimistes de l'atmosphère, paléoclimatologues les biogéochimistes marins. Cette pluridiscipli-

narité est parfaitement adaptée à l'étude du changement global, celui-ci impliquant le couplage entre toutes les composantes du système climatique.

Une des forces de la recherche française est sa capacité à s'organiser pour combiner des campagnes de mesures *in situ* et des capteurs satellitaires, avec des retombées rapides en recherche et en modélisation. Cette spécificité nationale fait que nos chercheurs s'impliquent dans la mise en place de missions satellitaires internationales. Ils participent aussi à la mise en place de grands programmes nationaux et internationaux, tels que MISTRAL, med-CORDEX, ou «l'Année de la Prévision Polaire».

En physico-chimie atmosphérique, la communauté est importante, relativement bien structurée et bénéficie d'une très bonne dynamique sur les chambres de simulation atmosphériques : EUROCHAMP2020 est un instrument européen piloté par la France. Sur le terrain, la France a coordonné plusieurs grandes campagnes de mesures incluant une synergie sol/avions/ballons (ex : MISTRALS – Charmex).

Le thème de la surveillance de la qualité de l'air, aux échelles régionales et continentales, bénéficie d'outils performants reconnus à l'international : données spatiales IASI, mesures aéroportées, réseaux sol (ICOS, ACTRIS), développements spectroscopie IR (CRDS, OF-CEAS). Concernant les GES, il faut noter la bonne visibilité du «global carbon project», et une participation française importante aux synthèses annuelles du bilan carbone mondial.

Dans tous les domaines, la communauté française est active dans le développement de la modélisation numérique. Ainsi, elle coordonne le consortium européen NEMO et le modèle communautaire côtier CROCO, participe systématiquement aux exercices d'inter-comparaison de modèles CMIP6, est leader sur les projets d'intercomparaison de simulations des paléoclimats, et dans le développement de modèles de circulation générale des atmosphères planétaires.

Une des forces de notre communauté est également la très forte implication de nombreux chercheurs dans la rédaction des rapports du

GIEC (5^e et 6^e rapports, rapports sur l'objectif 1,5°C, sur l'Océan et sur la Cryosphère), dans les grands programmes internationaux (WCRP, Future Earth...), ou dans la structuration de grandes campagnes d'observations.

En glaciologie, la France est l'un des rares pays à réaliser des observations continues et de long terme dans chacune des régions englacées (calottes polaires, glaciers) à travers le monde (Arctique, Antarctique, zones alpines, andines et himalayennes). En paléoclimatologie, les quatre grandes unités relevant de la S19 (CEREGE, EPOC, IGE et IPSL) mènent des projets complémentaires et en association. La communauté française devient ainsi un leader dans le développement de modèles incluant les proxies.

B. Faiblesses

Les systèmes d'observations sur lesquels sont basées nos recherches ont des soutiens techniques et financiers qui ne sont pas à la hauteur des enjeux. Le développement de nouveaux outils et de systèmes d'automatisation des mesures risque d'être freiné voire compromis du fait d'un manque de soutien technique et financier adapté.

Les secteurs d'embauche dans nos thématiques restent encore essentiellement académiques et en raison d'une difficulté croissante à être recruté, le nombre d'étudiants a tendance à diminuer. Il conviendrait d'élargir le socle des débouchés en promouvant par exemple un enseignement des sciences du climat et de l'environnement à tout les niveaux académiques.

Enfin, nous n'avons pas encore changé nos modes de travail pour nous adapter aux conditions nouvelles du changement climatique et nous devons penser nos activités futures dans ce contexte (cf. C.3).

C. Opportunités

L'augmentation de la puissance de calcul des modèles combinée à l'amélioration des

moyens d'observations, avec l'arrivée de nouveaux satellites (SWOT, WaCM, SEASTAR, Metop-SG) et la mise-en-place de réseaux d'observations (ARGO, EMSO, ACTRIS, Observatoires côtiers) vont permettre de produire et d'obtenir de plus en plus de données de haute qualité. Les nouvelles méthodes issues des sciences des données, actuellement en plein essor, seront essentielles pour permettre d'extraire les informations utiles de ces bases de données conséquentes. Les avancées technologiques pour la mesure in-situ (planeurs et drones sous-marins, flotteurs lagrangiens ARGO) seront cruciales pour améliorer la compréhension des processus dynamiques au sein et au fond des océans.

La synergie des données *in-situ* et satellitaires avec la modélisation permet d'améliorer notre vision 3D des océans et de l'atmosphère. L'automatisation et la diminution des coûts en biologie moléculaire (« Omics ») ouvrent de nouvelles pistes d'exploration du lien entre biogéochimie marine et processus biologiques, ainsi que de nouvelles thématiques.

La présence de nombreuses bases françaises en zone polaire et subpolaire via le soutien de l'Institut Polaire IPEV, mais aussi d'une Unité Mixte Internationale sur le sujet (Takuvik-France/Canada) sont des opportunités uniques qu'il convient de renforcer, d'ouvrir plus largement à la communauté et de pérenniser dans le temps.

D. Menaces

Il est notable que les recherches dans l'identification et la compréhension des processus fondamentaux sont de plus en plus difficiles à financer : les financements s'orientent en effet vers des questionnements à court terme liés à des demandes sociétales et cela au détriment de recherches nécessitant des études sur le long terme.

Une menace importante concerne les grandes infrastructures de recherche qu'elles

soient aéroportées ou océanographiques. Le renouvellement de l'avion de recherche Falcon constitue une priorité pour la communauté (notamment pour les études physico-chimiques).

On constate depuis une dizaine d'années en France et plus généralement en Europe une perte de vitesse des observations de la composition chimique et particulaire de l'atmosphère moyenne (stratosphère notamment).

Malgré l'urgence alarmante que constitue le thème de la qualité de l'air, le suivi des particules fines est à renforcer, mais nécessite une instrumentation coûteuse dans un contexte où les budgets se restreignent (comparé aux pays voisins, tels que l'Allemagne), d'où la nécessité d'une organisation entre recherche et surveillance (INERIS, ACTRIS, réseaux de surveillance).

Une menace importante résulte du morcellement et de l'empilement des structures administratives et décisionnaires. Ce problème de multiplication des « guichets » est très sensible dans le montage des campagnes en mer, ou pour les études de la cryosphère. Cette complexité est démotivante lorsqu'il s'agit, pour de jeunes chercheurs, de monter une grosse campagne (par exemple océanographique). Un problème de « leadership » va se poser, les coordinateurs d'aujourd'hui partant à la retraite.

Les évolutions en modélisation vers une plus grande résolution spatiale, vers une plus grande complexité des processus représentés et vers des méthodes ensemblistes nécessitent des moyens de calcul toujours plus importants. Le manque de visibilité à long terme sur les potentiels de calculs fait peser une menace sur l'évolution future et l'utilisation de nos modèles (voir aussi IV.B.5). Le manque d'infrastructures adaptées (GPU) à l'utilisation des algorithmes d'intelligence artificielle oblige actuellement les chercheurs à se tourner massivement vers les multinationales du monde internet, ce qui impactera la reproductivité des résultats.

IV. Organisation de la recherche, ressources humaines

A. Périmètre de la section, aspects pluridisciplinaires

La compréhension du système climatique est par essence pluridisciplinaire, cela transparaît dans les mots clés de la Section 19 que nous souhaitons faire évoluer en « physique, dynamique, chimie et biologie des domaines océanique et côtier, de l'atmosphère et de la cryosphère ». On le retrouve également dans les rattachements des unités aux sections autres que la S19 et aux instituts : près de 75 % des unités de recherche ayant la S19 comme section principale sont rattachés à des sections secondaires.

Les thèmes liés entre autres au domaine côtier, à la biodiversité, aux paléoclimats et à la sédimentologie, ou encore à la planétologie créent des liens forts avec la S30 (17 labos), la S29 (6 labos), la S18 (4 laboratoires), et la S17 (3 laboratoires). Les relations directes avec les sections disciplinaires sont moins fréquentes mais réelles, signe que les laboratoires de la S19 sont fortement attachés à des recherches fondamentales disciplinaires. Le GSMA, par exemple a pour institut de rattachement principal l'institut de physique. De ce point de vue, il est aussi à noter que les collaborations entre les physiciens, les biologistes, les biogéochimistes, les chimistes et les géologues ont notamment augmenté via les politiques de sites (ex : Labex CaPPA à Lille, Clervolc à Clermont Ferrand, LabexMER/EUR ISBlue à Brest). Par ailleurs, environ 10 % des chercheurs de la S19 sont dans des unités n'ayant pas la S19 comme section principale.

La S19 est aussi étroitement liée à la section interdisciplinaire CID52, même si ces liens pourraient se renforcer, par exemple dans le cadre

de la prise de conscience de la pollution par les plastiques et leur transformation en micro et nanoparticules. Il est aussi notable que les études en géo-ingénierie et en énergie renouvelable se font en collaboration étroite avec les spécialistes du climat de la S19 (IPSL, LATMOS, LEMAR...). On peut aussi noter que les interactions avec l'économie, la santé, l'agriculture, la biologie, et les sciences sociales se mettent en place et se développent. À titre d'exemple, l'utilisation des produits aérosols satellitaires comme MODIS ont permis l'étude des épidémies de méningites en Afrique de l'Ouest associés à l'occurrence d'événements de poussières. De manière plus générale il semble incontournable que les relations entre environnement (changement climatique) et inégalités deviennent un sujet d'étude important.

B. Outils de la recherche

1. Grands chantiers

La période a été marquée par la maturation du méta-programme MISTRAL et du chantier ARCTIQUE, c'est à dire deux chantiers axés sur la compréhension de la régionalisation du changement climatique dans deux zones particulièrement sensibles. MISTRAL dans sa forme est extrêmement ambitieux puisqu'il regroupe plusieurs programmes d'envergures, par exemple : ChArMEx, (chimie), HyMex (météorologie et cycle de l'eau), MerMex (biogéochimie) et PaleoMex (paléoclimats). L'ensemble a pour but affiché l'interdisciplinarité, afin de mieux comprendre les interactions entre climat, sociétés et civilisations. Si chacun des programmes a permis de porter des recherches pertinentes concernant par exemple la spécificité de la régionalisation dans le changement climatique ou le rôle des aérosols, la lourdeur de l'ensemble a rendu difficile les actions transverses, pourtant objectif initial du programme. La difficulté de la mise en place a aussi eu tendance à figer ensuite les thèmes de chacun des programmes.

Le Chantier ARCTIQUE Français souffre moins de ces défauts, un de ces thèmes privilégiés

concernant les interactions aux interfaces ; thème à la fois central pour la compréhension de l'évolution des glaces et très ouvert scientifiquement. En contrepartie, ce programme est beaucoup moins large en termes de nombre d'équipes investies et d'ouverture.

2. Infrastructures

Les chercheurs de la section 19 bénéficient pour leurs recherches en physique et en chimie de l'atmosphère d'aéronefs instrumentés opérés par l'infrastructure SAFIRE. Cela permet à la France de se situer (et de s'intégrer) à un très bon niveau Européen. On note cependant que deux avions de recherche arrivent en fin de vie (le Falcon 20 et l'ATR-42), entraînant une inquiétude de la part de la communauté concernée vis-à-vis de leur renouvellement.

En océanographie côtière et hauturière ainsi qu'en paléocéanographie les chercheurs bénéficient de la TGIR « Flotte Océanique Française », qui leur permet d'atteindre des résultats scientifiques tout à fait remarquables. Cependant, les difficultés de financement de campagnes de grandes envergures et de projets collaboratifs font qu'il est de plus en plus compliqué d'utiliser la flotte française.

Dans le milieu polaire, la France bénéficie d'un contexte extraordinaire, propices aux observations de terrains interdisciplinaires avec les îles des Terres Australes et Antarctiques Françaises, les stations australes Concordia et Dumont d'Urville et celles boréales de Rabot et Corbel au Spitzberg. Ces infrastructures doivent être préservées tout en renforçant les collaborations avec d'autres nations.

3. Observations spatiales

La position des chercheurs de la S19 dans le domaine de l'observation satellitaire de pointe est tout à fait remarquable : nombreux sont PI ou co-I de projets internationaux. Cette activité se développe toujours plus du fait de la demande de surveillance des pollutions à

l'échelle globale/régionale, ou de la compréhension des mécanismes d'échelles de plus en plus petites (micro-physique des nuages, filaments océaniques). Cette surveillance est une responsabilité qui pèse de plus en plus sur les chercheurs de la S19. Elle dicte à nouveau un agenda qui peut éloigner de préoccupations plus fondamentales.

4. Moyens analytiques et mesures in Situ

L'analyse des éléments traces et des isotopes, la compréhension des cycles biogéochimiques ou des réactions chimiques dans l'atmosphère (les atmosphères si on inclut les planètes) nécessite des moyens analytiques de pointe et des réseaux de mesures *in situ*. De ce point de vue, la recherche en France est bien positionnée. À titre d'exemple, elle a accompagné le développement de moyens de mesures à vecteurs autonomes, (bouées/flotteurs dérivants, planeurs sous-marins). Cette tendance à la miniaturisation est générale dans nos disciplines, avec le développement des micro-capteurs citoyens pour suivre la pollution atmosphérique, des sondes autonomes pour les sondages en Arctique et Antarctique (bouées IAOOS, sonde Subglaciator).

Sur ces questions, les chercheurs de la S19 ont aussi su se coordonner, via l'INSU, dans la mise à disposition des données et leur jouvence à long terme en mettant en place des services nationaux d'observations (SNOs), eux-même administrés en observatoires (OSU). Bien que cela ait tendance à produire des structures nouvelles, et à alourdir le mille-feuille administratif, cela permet de constituer des bases de données continues sur le moyen terme, et de veiller à leur sauvegarde et à leur valorisation.

5. Modélisation

La météorologie, l'océanographie et l'ensemble des sciences du climat ont toujours été parmi les plus grosses disciplines en termes de besoin numérique. La recherche en

France de ce point de vue se situe à un très bon niveau international. Un effort majeur a été fait ces dernières années pour adapter le cœur de nos modèles à la structure des machines de demain. Cette recherche a bénéficié de la mise en commun des moyens alloués grâce à la mise en place du GENCI. Cependant, alors que notre domaine est régulièrement cité en exemple d'utilisation de ces calculateurs, la visibilité pluri-annuelle d'allocation de demandes d'heures reste difficile. De ce point de vue, le paysage futur, ou l'Europe sera appelée à jouer un rôle important, ne nous permet de gagner en visibilité.

C. Science ouverte, relations avec l'université, empreinte environnementale

1. Science ouverte

La question de la science ouverte est assez peu tranchée en section 19. Les journaux dominants pratiquent peu l'« Open Access », certains pratiquent au mieux le semi-« Open-Access », et les chercheurs commencent à donner régulièrement accès à leurs articles via la base de données HAL.

Cette question de l'accès libre se pose également pour les données, et cela dans le contexte des techniques d'apprentissage profond, où des multinationales du monde internet pourront accéder et valoriser les données en utilisant des logiciels propriétaires.

2. Relation avec l'université

Le lien entre le CNRS-INSU et les universités reste fort, en particulier au travers des UMRs. Cependant, les profonds changements qui ont affectés les universités françaises ces dernières années ont modifié ce rapport. Pour l'INSU, un des éléments forts de la politique vis-à-vis des universités se fait par l'intermédiaire des OSU,

et force est de constater que la situation est loin d'être homogène en France.

Dans certaines universités, le rôle structurant que peut jouer un OSU a été bien intégré lors des regroupements/ restructurations. L'IUEM à Brest ou Pythéas à Aix-Marseille en sont de bons exemples. Dans ces universités, les UMR de la section 19 bénéficient de la dynamique instaurée par l'OSU et le rôle du CNRS-INSU y est assez clair. Dans d'autres universités par contre, l'OSU, quand il existe, reste un objet difficile à appréhender et à intégrer dans l'organigramme. À Lille par exemple, le regroupement des trois universités a conduit à la mise en place de Facultés de grandes dimensions qui semblent exclure la possibilité de créer un OSU. À Bordeaux, l'OSU existe déjà depuis un certain temps, mais il n'a pas trouvé une place visible dans la restructuration en Départements.

En Ile de France le réseau en constante évolution avec la création de plusieurs universités de très grandes taille a rendu les réorganisations plus difficiles. Les structures existantes se sont « emboîtées » moins bien qu'ailleurs : plusieurs OSU ont été créés (par exemple Efluve, OVSQ, Ecce-Terra) et une a été supprimée (l'IPSL en tant qu'OSU). Ce morcellement a rendu les OSU moins visibles qu'auparavant même si la situation se stabilise. Pour les UMR, dont certaines sont associées à plusieurs universités et grandes écoles, la compétition entre les tutelles apparue dans le sillage de la LRU a pu avoir un effet déstabilisateur. Dans ce contexte, il apparaît encore plus essentiel que le CNRS continue à jouer un rôle fédérateur, tant au niveau d'une mise en commun de certains outils que pour l'animation de la communauté scientifique : les universités se focalisent de plus en plus sur des appels d'offre et dans la création de structures inter-disciplinaires.

Le réseautage de plus en plus intense des universités au niveau européen, au travers de programmes structurants comme la European University Initiative risque aussi de réduire le rôle du CNRS dans le pilotage de la recherche française (UBO dans le projet European Uni-

versity of the Seas) ou le LIENS (ULR dans le projet European University for Smart Coastal Urban Sustainability). Si ces projets apparaissent avant tout comme des réseaux d'éducation, ils pourraient déboucher sur des associations en recherche, où le rôle du CNRS ne semble pas clairement défini pour le moment. De même, le rôle du CNRS dans la mise en place des EUR (« graduate schools ») est parfois flou, surtout quand le nombre de partenaires est important (une dizaine de partenaires pour l'EUR ISblue à Brest, voire plus pour l'EUR IPSL en Ile de France).

Au final, dans le secteur scientifique couvert par la section 19, mais aussi plus généralement en sciences dures, il existe un sentiment de perte de vitesse du CNRS dans la structuration de la recherche française au profit des universités. Dans notre discipline, le CNRS a cependant un rôle à jouer, par exemple en maintenant des structures de taille critique, réparties sur plusieurs pôles universitaires. De ce point de vue, la « base » joue un rôle remarquable : de plus en plus de chercheurs CNRS s'impliquent dans des tâches d'enseignement.

3. Empreinte environnementale

Une adéquation entre nos pratiques de recherche et l'urgence environnementale sur laquelle nombre d'entre nous travaillent est absolument nécessaire : l'empreinte carbone liée à nos déplacements et missions, à l'utilisation de plus en plus massive de supercalculateurs, aux campagnes de terrain dans les mers, les airs, et jusqu'aux zones polaires, ou encore aux lancements de satellites n'est pas négligeable. De nombreux groupes de réflexion sur ce thème ont vu le jour dans les laboratoires et des collectifs comme Labos 1point5 se sont formés. Ils proposent de discuter de recommandations raisonnables permettant de modérer cet impact (réduire le nombre de déplacements, privilégier le train par rapport à l'avion, encourager de nouveaux outils de communication comme la télé-présence immersive, etc.).

V. Aspects statistiques

A. Parité

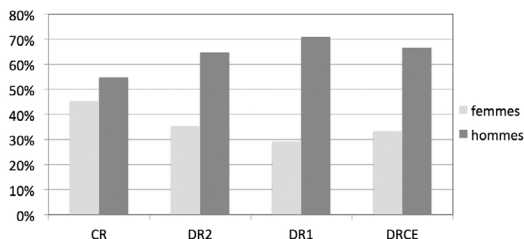


Figure 1 : Répartition hommes/femmes selon les grades et les corps de chercheurs.

Sur les 283 chercheurs de la section 19 au 1^{er} janvier 2019, 39% sont des femmes. Ce déséquilibre par genre est présent dans toutes les disciplines sauf en chimie atmosphérique. Il est particulièrement marqué en planétologie et en glaciologie où l'on trouve moins de 25% de femmes. Le rapport femmes/hommes est fortement déséquilibré si l'on considère la répartition par corps (Fig. 1). Parmi les CR, 46% sont des femmes, elles ne sont plus que 33% chez les DR, dont 29% chez les DR1.

Ces dernières années, le pourcentage de femmes candidates au concours CRCN est de l'ordre de 30% et ce nombre décroît fortement pour le concours DR2 (20-25%). En revanche, il ne reflète en rien celui des femmes promouvables DR2, qui est de 46% en section 19. Pour remédier à ce biais systématique, un travail de sensibilisation est en cours, afin d'inciter les jeunes chercheuses à postuler sur des concours et promotions.

B. Unités

Au 1^{er} janvier 2019, 23 unités de recherche (21 UMR et 2 UMI) sont rattachées principalement à la section 19. En 2017, on peut noter la création de l'IGE à Grenoble regroupant le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géo-

physique de l'Environnement) et le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement). En plus de l'INSU, presque toutes les unités sont rattachées à l'INEE avec la double tutelle ou en institut secondaire, certaines également à l'INC (1), l'INSIS (3), et l'INSB (2).

C. Chercheurs

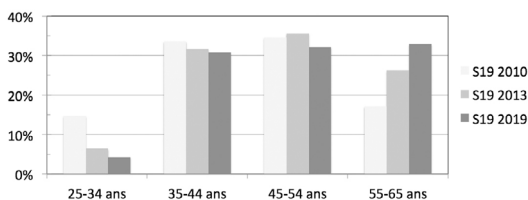


Figure 2 : Évolution de l'âge des chercheurs relevant de la section 19 en 2010, 2013, 2019.

En comparaison avec les rapports de conjoncture du CNRS de 2010 et 2014, la section 19 subit un vieillissement marqué, avec une nette diminution de la proportion des chercheurs dans la tranche d'âge 25-34 ans, et une forte augmentation dans celle des 55-65 ans (Fig. 2). On notera en particulier que 7 chercheurs ont plus de 65 ans alors qu'ils n'étaient que 2 en 2014.

Au 1^{er} janvier 2019, 3% des chercheurs sont Directeurs de Recherche de Classe Exceptionnelle (9 chercheurs), 19% Directeurs de Recherche de 1^{re} classe (55 chercheurs), 29% de 2^e classe (82 chercheurs), 48% sont CR (137 chercheurs).

En ce qui concerne les concours CRCN, plusieurs faits sont marquants. Le passage à un concours unique pour le corps des chargés de recherche en 2018 a amené, en 2018 et en 2019 à une légère augmentation du nombre de candidats expérimentés (avec plus de 4 ans d'expérience post-thèse). Pour remédier à cela, un effort de sensibilisation systématique a été fait pour encourager les candidatures jeunes. En cohérence, pour les deux années 2018 et 2019, la moyenne du nombre d'années

d'expérience des recrutés est proche de celle des chercheurs recrutés en CR2 en 2017, montrant que la suppression des deux catégories n'a pas eu pour effet de favoriser les candidats ayant le plus d'expérience. Enfin, la section note que relativement peu de candidats se présentent conjointement dans les sections interdisciplinaires (CID) et en S19, malgré les enjeux majeurs relatifs aux questions actuelles sur le changement climatique et ses impacts. Il serait pertinent que les interactions se renforcent.

D. Autres organismes

Dans les 21 UMR rattachées principalement à la section 19, le nombre de chercheurs d'autres organismes est important : 472 Enseignants-chercheurs, 102 chercheurs IRD, 40 chercheurs Météo-France (CNRM essentiellement), 56 chercheurs CEA (surtout au LSCE), et 40 chercheurs de l'IFREMER (LEMAR et LOPS).

E. Ingénieurs, techniciens et administratifs

Dans les 21 UMR rattachées principalement à la section 19, on recense 852 IT pour environ 1 087 chercheurs tous organismes confondus. Le CNRS est bien le principal organisme qui y contribue avec 322 IT. Météo-France (192 IT) est le second contributeur avec une position particulière liée à ses missions opérationnelles. L'université n'arrive qu'en 3^e position avec 175 IT.

Si l'on prend en compte, en plus de ces 21 UMR, les 8 UMS rattachées principalement à la section 19 (ICARE, IUEM, SAFIRE, FOV, OVSQ, OSU-Réunion, EFLUVE, OMP), le nombre total d'IT s'élève à 1 041 pour 1 097 chercheurs tous organismes confondus. Le CNRS reste le 1^{er} contributeur (398 IT), devant l'université (273 IT), Météo-France (204 IT), l'IRD (57), le CEA (45, tous au LSCE) et l'IFREMER (41 à Brest) qui contribuent également aux personnels des UMR et UMS rattachées principalement à la section 19.

SECTION 20

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET STRUCTURALE, BIOCHIMIE

Composition de la section

Yves GAUDIN (président de section), Emmanuel TÉTAUD (secrétaire scientifique), Jean-Marc BERJEAUD, Nathalie COLLOCH, Frédérique DE WITTE, Fabrice FLEURY, Sylvie FOURNEL-GIGLEUX, Ines GALLAY, Emmanuel GIUDICE, Marie-Thérèse GIUDICI-ORTICONI, Jérôme GOLEBIEWSKI, Stéphane GRIMALDI, Isabelle IMBERT, Jean-Michel JAULT, Roland MARQUET, Gladys MBEMBA-LOUMPANGOU, Isabelle SCHALK, Guy SCHOEHN, Carine TISNE-VICROBECK, Gilles TRUAN, Alexis VERGER.

Résumé

Les chercheurs et équipes dépendant de la section 20 cherchent à élucider les processus moléculaires qui régissent les systèmes biologiques. La diversité des organismes et fonctions étudiés ainsi que la variété des techniques et approches expérimentales fait de la section 20 une section « cœur de métier » de la biologie située au carrefour de nombreuses disciplines et jouant un rôle majeur aux interfaces de la biologie avec la chimie, la physique et l'informatique ainsi que dans le développement de la biologie intégrative et synthétique. Les laboratoires dépendant de la section sont présents sur tous les grands campus du CNRS. Les recherches fondamentales qui y sont menées ont des retombées potentiellement importantes dans les domaines médicaux et environnementaux.

Introduction

La compréhension fine de la cellule passe par le décryptage des mécanismes moléculaires permettant le fonctionnement de l'ensemble de ses machineries. Ce thème est largement porté par les chercheurs et laboratoires dépendant de la section 20. Le champ couvert par la section est vaste et fait appel à des approches très variées mais complémentaires allant de la biologie moléculaire à la modélisation en passant par la biochimie, la biologie structurale et la biophysique. Il s'agit d'identifier les macromolécules et les complexes qu'elles forment puis de caractériser leur structure et leur dynamique. Il faut ensuite replacer ces assemblages dans leur environnement cel-

lulaire naturel pour comprendre le fonctionnement des réseaux d'interactions, de signalisation ou bien encore métaboliques, dont ils font partie.

De nombreuses équipes dépendant de la section 20 ont des approches abordant diverses échelles de temps et de dimension (de la molécule à la cellule voire à la population) et sont, par conséquent, très actives sur le front de la biologie intégrative. Leurs travaux, en permettant de comprendre, puis de concevoir et de construire des objets biologiques ayant des fonctions déterminées, ouvrent par ailleurs de nombreuses perspectives en biologie de synthèse.

Parmi les grands axes de recherche, on mentionnera la caractérisation moléculaire et structurale des protéines et des acides nucléiques, les aspects dynamiques et la réactivité des macromolécules et leurs assemblages, les mécanismes de transduction du signal et leurs régulations ainsi que les maturations post-traductionnelles. Quelques domaines sont l'apanage de la section parmi lesquels l'enzymologie, le métabolisme bactérien, la bioénergétique et la biologie fonctionnelle et structurale des protéines membranaires et des ARN.

Par essence, la section 20 a un positionnement interdisciplinaire à l'interface avec d'autres sections dépendant de l'INSB mais aussi avec les autres instituts du CNRS travaillant dans le domaine de la chimie, de la physique, des mathématiques et des sciences de l'ingénieur (INC, INP, INSIS). Ainsi, des liens forts existent avec les sections 21 (dans le domaine de la génomique), 22 (sur des aspects liés au transport, à la compartimentation et à la signalisation cellulaires), 23 (sur des aspects mécanistiques chez les végétaux), 27 (à travers la virologie et la bactériologie moléculaire et structurale), 28 (à travers l'ingénierie biologique) et 54 (instrumentation pour l'étude d'objets biologiques). Des liens étroits existent également avec la section 16 dépendant de l'INC (chémiobiologie, spectroscopies, nouvelles sondes chimiques), la physique et les mathématiques étant quant à elles pourvoyeuses de modèles et d'outils de calcul dédiés.

Les laboratoires ayant la section 20 comme section principale ou secondaire se retrouvent dans tous les grands campus du territoire national : Paris, Saclay, Strasbourg, Lyon, Grenoble, Marseille, Montpellier, Lille, Toulouse, Bordeaux et Nancy.

Il convient de mentionner que les recherches de la section 20 ont des retombées potentielles dans le domaine médical à travers le développement de molécules actives ou dans le domaine environnemental à travers la recherche sur les bioénergies et la fermeture du cycle du carbone.

I. Biologie structurale

A. La révolution de la microscopie électronique

Les deux techniques « historiques » de la biologie structurale que sont la cristallographie aux rayons X et la RMN continuent à produire de nombreuses structures de protéines et de complexes macromoléculaires à résolution atomique – ce qui est indispensable pour en comprendre le fonctionnement -. Néanmoins, une troisième technique, la cryo-microscopie électronique (cryo-ME), est en train de changer le paysage dans le domaine.

Cette technique a connu une réelle révolution instrumentale et atteint maintenant sa pleine maturité. Les caméras à détection directe d'électrons, le développement de microscopes très stables et automatisables ainsi que de nouveaux logiciels d'analyse d'images permettent d'obtenir régulièrement des structures à une résolution meilleure que 3,5 Å.

Le nombre de structures tridimensionnelles déterminées par cryo-ME déposées chaque année ne cesse d'augmenter : il était d'environ 200 en 2010, de 1 100 en 2017 et de 1 700 en 2018. La proportion de structures affichant une

résolution meilleure que 4 Å progresse également et représente en 2019 près de 50% des structures déposées contre 30% en 2018 et 25% en 2017.

La cryo-ME permet de déterminer des structures de protéines de plus en plus petites : le record inférieur de taille pour une structure de protéine déterminée à résolution atomique est actuellement de 52 kDa. Ceci a été rendu possible grâce à un autre développement technologique : la plaque de phase.

Néanmoins, la cryo-ME est surtout devenue la technique de choix pour déterminer les structures à haute résolution de gros complexes multimoléculaires (tels que les virus réguliers et les machineries multi-protéiques ou nucléoprotéiques). Celles-ci étaient pour la plupart inaccessibles aux autres techniques de biologie structurale du fait de leur taille trop importante, de leur flexibilité et de leur variabilité conformationnelle. Ceci n'est pas un problème en cryo-ME car, *in silico*, il est possible de se focaliser sur les parties rigides des complexes ou bien de séparer un nombre discret de conformations. Lorsque les résolutions atteintes ne sont pas d'ordre atomique, les cartes de densité obtenues pour des complexes peuvent être combinées avec les structures atomiques des différents composants obtenues par d'autres méthodes pour générer des modèles dits pseudo-atomiques.

La cryo-ME a notamment permis de progresser dans la résolution de la structure des protéines membranaires, cibles thérapeutiques importantes pour l'industrie pharmaceutique. Bien que ces protéines fussent notoirement difficiles à cristalliser, de nombreux laboratoires disposaient déjà d'échantillons purs et homogènes, maintenus en solution soit à l'aide de détergents non ioniques ou d'amphiphiles, soit par insertion dans des nanodisques mimant l'environnement membranaire. Ces travaux préliminaires ont été déterminants pour la résolution de la structure des protéines d'intérêt par cryo-ME. Ces structures permettent d'avoir accès à l'interaction des protéines membranaires avec les lipides, de déterminer le mode d'action de différentes drogues dans le cas de récepteurs neuronaux et de transpor-

teurs et, pour ces derniers, de comprendre les mécanismes d'efflux de drogues tels qu'antibiotiques ou anticancéreux.

Il convient aussi de mentionner la tomographie électronique, une technique qui consiste à reconstruire un volume unique (partie d'une cellule ou d'une bactérie, virus non régulier, etc.) en l'observant sous un grand nombre d'angles différents. Elle permet de déterminer la structure des complexes macromoléculaires dans leur contexte naturel. Néanmoins, la tomographie n'a pas encore atteint sa maturité : elle reste limitée en résolution en raison des dommages d'irradiation importants générés par les prises de vue multiples et la sensibilité limitée des caméras.

Malgré l'importance de ces techniques, il y a un manque flagrant de cryo-microscopes de dernière génération en France. Il n'y a actuellement qu'un seul microscope Titan Krios « français » à Strasbourg et un autre, européen, à l'ESRF qui sont disponibles pour la communauté nationale. On peut y ajouter un autre microscope Titan Krios installé à l'Institut Pasteur qui est néanmoins très peu accessible pour les utilisateurs externes. Ceci doit être comparé avec la vingtaine d'appareils disponibles en Angleterre et en Allemagne. Cet environnement n'est pas attractif pour des microscopistes travaillant à l'étranger et ne permet pas le développement de la cryo-ME en France. Le nombre de microscopistes présents en France reste donc insuffisant, même si les biologistes structuraux commencent à se former à cette technique et qu'un nombre croissant de candidats formés à l'étranger se présentent au concours d'entrée au CNRS. Le maintien de la compétitivité de la biologie structurale française passe donc par une augmentation significative du nombre de microscopes de pointe accessibles à la communauté.

B. De nouvelles techniques émergentes

En complément de la tomographie, de nouvelles approches sont actuellement en cours de

développement. Elles ouvrent un champ plein de promesses dans notre compréhension des assemblages macromoléculaires et dans le domaine de la biologie structurale intégrative (cf. section VII.A).

On mentionnera d'abord la microscopie à force atomique à haute vitesse qui permet de suivre les changements de conformation en temps réel à l'échelle de la particule isolée mais aussi les derniers développements en spectrométrie de masse qui permettent d'étudier les complexes natifs et de cartographier les zones d'interactions entre protéines au sein d'un assemblage.

Enfin, l'avènement de la cristallographie sérielle et des lasers à électrons libres (*X-ray free electron laser*; XFEL) permet un changement de paradigme en cristallographie macromoléculaire. Ces sources, 10 fois plus brillantes que les synchrotrons, autorisent la collecte de données à partir de nanocristaux à température ambiante. Cette technique permet aux chercheurs d'avoir une vision statistique des structures moléculaires et d'étudier la dynamique d'équilibre des protéines ou encore l'évolution de systèmes non-réversibles (jusqu'à une résolution de $\sim 10^{-15}$ s dans les XFEL). Pour tirer pleinement avantage de cette technologie, il est maintenant nécessaire de développer des techniques permettant de disposer de quantités importantes de micro/nano cristaux de qualité. La possibilité d'obtenir des cristaux *in vivo* ouvre le champ à la détermination de structures de complexes naturels des protéines d'intérêt avec leurs cofacteurs.

De nombreux investissements ont été réalisés au niveau national et européen pour faciliter la mise en œuvre des expériences de cristallographie sérielle, avec la mise en place d'une seconde ligne de lumière dédiée à l'ESRF, d'une ligne de lumière dédiée à PETRAIII et la mise en place de configurations interchangeableables à SOLEIL et DIAMOND. Le CNRS et le CEA ont aussi investi dans la construction du European XFEL et la ligne SPB/SFX, qui permet des expériences de pointe en (nano)-cristallographie sérielle résolue en temps. Certaines équipes du CEA et du CNRS ont aussi contribué au développement de la

technologie. Néanmoins, les compétences adéquates devront être recrutées. Dans le cas contraire, il y a un risque réel que ces activités pionnières piétinent, voire s'éteignent, dans les laboratoires concernés.

II. Dynamique des macromolécules et de leurs assemblages

A. Dynamique moléculaire et modélisation

La relation entre la séquence d'une protéine ou d'un acide nucléique et leur(s) fonction(s) reste un des grands défis de la biologie. Bien qu'il paraisse intuitif que les propriétés des systèmes biomoléculaires soient codées par leurs séquences, leur décodage à travers l'établissement de modèles prédictifs reste un défi majeur. La difficulté tient notamment à la formidable complexité de la dynamique de tels systèmes et, en conséquence, de celle du paysage d'énergie des macromolécules biologiques. Les propriétés ne sont pas uniquement la conséquence de leur structure statique, mais sont associées à la dynamique d'interconversion entre de multiples états de stabilités relatives différentes. À titre d'exemple, l'activité de ligands sur les récepteurs couplés aux protéines G résulte de la sélection par les ligands de conformations spécifiques de ces récepteurs, qui oscillent entre différentes formes actives, inactives ou semi-actives.

L'augmentation de la puissance informatique laisse entrevoir la possibilité de simuler le comportement dynamique de systèmes biomoléculaires complexes sur des échelles de temps de plus en plus longues, permettant ainsi d'apporter des hypothèses sur les relations séquence-fonction. Toutefois, ces simula-

tions produisent des quantités de données parfois délicates à stocker, manipuler et analyser. Dès lors, de nouvelles stratégies d'analyse se mettent en place, afin de tirer les informations pertinentes issues des modèles.

Le standard actuel vise l'augmentation de l'échantillonnage statistique des conformations moléculaires. Il est désormais clair que les deux piliers de la modélisation moléculaire, à savoir (i) la prédiction de l'affinité ligand-récepteur et (ii) l'échantillonnage des structures les plus stables requièrent des temps de calcul longs. Les temps de simulation à l'état de l'art se situent autour de la microseconde mais atteignent parfois la milliseconde, voire davantage.

Ces échelles de temps sont majoritairement accessibles grâce à l'utilisation de supercalculateurs, nationaux ou internationaux, qu'il faut continuer de faire évoluer régulièrement. À cet égard, la puissance et les temps de calcul typiquement obtenus sur les calculateurs nationaux restent assez faibles en comparaison avec la concurrence internationale. L'utilisation de cartes graphiques, maintenant utilisées en cryo-ME, permettrait d'atteindre des puissances qui surpassent de loin les processeurs classiques, mais les calculateurs nationaux restent en retrait sur de tels investissements, bien que le coût de telles cartes ne soit pas prohibitif.

Une alternative méthodologique permettant d'augmenter la force de l'échantillonnage repose sur la mise en œuvre de représentations alternatives de systèmes de grande taille. Les approches dites "gros gain" simplifient la version atomique d'un système moléculaire en utilisant des billes qui modélisent un ensemble d'atomes, comme tout ou partie d'un acide aminé. La propagation des équations de dynamique moléculaire est alors grandement accélérée, permettant facilement d'atteindre des temps de l'ordre de la micro- ou la milliseconde. De telles simulations permettent de modéliser des effets difficilement accessibles par des approches plus conventionnelles, tels que de la plasticité de grands systèmes multipartenaires ou les courbures de membranes phospholipidiques. Des développements restent toutefois à poursuivre, notamment dans le cas où des approches hybrides sont néces-

saires, par exemple lorsque certaines parties du système d'intérêt doivent absolument être représentées au niveau atomique. Dans la même logique, les approches hybrides mécanique quantique / mécanique moléculaire ont aussi fait la preuve d'un grand intérêt lorsque la description de réactions biochimiques entre en jeu. Pour l'ensemble de ces approches hybrides, la limitation du modèle est due à la représentation de l'interface entre les deux types de représentation moléculaire.

Éventuellement, la comparaison avec des données expérimentales mesurées sur des échelles de temps relativement longues se fait *via* l'utilisation de répliques d'un même système, simulées sur des temps plus courts. Des comportements très complexes, comme le repliement d'une protéine ou la cinétique d'association avec un ligand peuvent alors être modélisés en utilisant des algorithmes basés sur les chaînes de Markov. Il s'agit de combiner les informations obtenues sur des répliques du système qui capturent des informations cruciales pour établir un modèle qui récapitule une propriété associée à un temps plus long que celui de chacune des simulations. De telles approches ouvrent la voie à des interactions plus soutenues entre des équipes de modélisation et leurs partenaires qui réalisent les expériences en laboratoire.

Le lien des modèles numériques avec l'expérience est aussi fortement accéléré par la mise en œuvre d'approches de « machine learning ». Bien qu'étant d'un faible niveau explicatif, les approches d'intelligence artificielle offrent dans bien des cas des performances prédictives spectaculaires. L'intégration d'activités de chémo-informatique ou de chémo-protéométrie permettra de traiter les données de simulations de dynamique moléculaire de manière plus efficace et plus prédictive.

Au-delà des protéines isolées, la dynamique d'autres systèmes biomoléculaires fait l'objet de nouveaux défis. Grâce à l'augmentation des performances matérielles et logicielles évoquées plus haut, les systèmes multimériques complexes (associant éventuellement des protéines membranaires) deviennent accessibles à des temps de calculs longs, ce qui permet de

décrypter des phénomènes à longue distance. De tels systèmes sont prototypiques des machines allostériques, pour lesquelles les signaux peuvent transiter sur des distances de plus de 30 Å.

En termes de flexibilité, les oligosaccharides et les ARN constituent une famille de composés de référence. La surface d'énergie des oligosaccharides est extrêmement complexe, ce qui constitue un défi pour la modélisation moléculaire. Les carbohydrates jouent un rôle central dans de nombreux systèmes biologiques, notamment dans les phénomènes de reconnaissance et d'adhésion hôte-pathogène. Les ARN sont des molécules très chargées qui adoptent des repliements très variés, difficilement prédictibles, dont la dynamique joue un rôle essentiel pour leur fonction. Dans ces deux cas, la compréhension d'une dynamique complexe, liée aux développements de champs de force adaptés, ouvre la voie à la conception rationnelle de ligands mimétiques de haute affinité.

B. Protéines intrinsèquement désordonnées

Du point de vue de la dynamique de la chaîne polypeptidique, les protéines intrinsèquement désordonnées (IDP) constituent un cas extrême. Elles sont beaucoup plus présentes chez les eucaryotes que chez les procaryotes, ce qui pose d'ailleurs des questions concernant leur apparition et leur évolution. Elles contiennent de grands segments de leur séquence qui ne possèdent pas de structure tertiaire définie et qui ont une faible propension à adopter des structures secondaires canoniques. Il est prédit qu'environ 35 % des protéines humaines contiennent des séquences de plus de 30 acides aminés contigus qui n'adoptent pas de structure définie. Dans des cas extrêmes, le désordre structural peut s'étendre à l'ensemble de la chaîne polypeptidique.

Ces protéines possèdent en général un grand nombre de partenaires et jouent un

rôle central dans les réseaux d'interactions protéine/protéine et protéine/ARN. L'interaction avec un partenaire peut se traduire par une transition désordre/ordre et la formation locale d'une structure secondaire au site de liaison. Néanmoins, dans certains cas, le désordre semble subsister au sein même du complexe. Un domaine désordonné, en interagissant transitoirement avec un domaine structuré adjacent ou non, peut aussi influencer l'interaction de ce dernier avec un partenaire. Les aspects thermodynamiques associés au comportement de ces domaines désordonnés restent d'ailleurs assez méconnus.

Bien qu'étudiées depuis plusieurs années, ces protéines sont l'objet d'un regain d'intérêt important puisqu'il apparaît qu'elles sont à l'origine de séparation de phases conduisant à la formation d'organites liquides (cf. VI.) et sont aussi impliquées dans la formation de structures amyloïdes potentiellement pathogènes.

Une des questions majeures dans le domaine concerne l'ensemble de conformations décrit par ces protéines. La spectroscopie RMN en solution convient particulièrement à ces études même pour de très grandes protéines intrinsèquement désordonnées. Couplée au SAXS, elle permet de décrire les conformations majoritaires en solution, le taux d'occupation de ces conformations par la protéine ainsi que l'influence de la présence d'un ligand sur l'ensemble des conformations. Néanmoins, toutes ces études ont été réalisées *in vitro* et en solution. Le défi dans le domaine est maintenant de comprendre l'influence de l'encombrement moléculaire sur cet ensemble et aussi si ce sont les mêmes conformations qui sont présentes au sein des organites liquides dans la cellule. Pour cela, il faudra travailler sur des systèmes reconstitués ou caractériser directement le comportement de ces protéines dans la cellule. Ceci implique des développements en RMN qui, couplés à des études en smFRET (impliquant des incorporations d'acides aminés non naturels et de la chimie click) devraient permettre de mieux comprendre le comportement dynamique de ces protéines et

d'identifier les interactions faibles à l'origine de la séparation de phase.

Enfin, si de nombreux programmes permettent l'identification des régions intrinsèquement désordonnées dans une séquence protéique, il est encore délicat de prédire leur propension à adopter une structure secondaire particulière et l'espace conformationnel, très vaste, exploré par ces domaines désordonnés n'est que très difficilement modélisable. De même, leur capacité à induire une séparation de phase n'est pas prédictible. Ceci s'explique probablement par notre ignorance de la nature des interactions faibles permettant la cohésion de la phase liquide formée par ces polypeptides mais aussi par la très grande variabilité de ces régions dans des protéines homologues.

III. ARN

A. ARN régulateurs

Les ARN régulateurs englobent non seulement les ARN non codants bactériens et eucaryotes, mais aussi un grand nombre d'ARN codants dont certains domaines structurés jouent un rôle régulateur. Les ARN non codants bactériens sont impliqués dans de vastes réseaux de régulation dont on découvre progressivement la complexité. Ces réseaux comprennent aussi bien des régulateurs de la transcription que de la traduction ou de la stabilité des ARNm. Ils régulent un nombre important de fonctions, allant de l'adaptation du métabolisme aux fluctuations du milieu jusqu'à la virulence des bactéries pathogènes. Il est à noter qu'il existe aussi des ARN régulateurs chez les phages et que nombre d'exemples de régulation croisée entre phages et bactéries ont été décrits.

Chez les eucaryotes, les miARN (micro-ARN) sont aussi impliqués dans des réseaux

complexes de régulations en agissant au niveau post-transcriptionnel ; ils jouent un rôle dans de nombreuses fonctions normales et dysfonctionnements pathologiques (cancers, problèmes cardiaques liés à l'âge, etc.) et leur niveau d'expression (synthèse et dégradation) est lui-même finement contrôlé. Bien que leur activité antivirale chez les plantes soit bien établie, leur efficacité dans la défense innée contre les virus chez l'homme reste un sujet d'intenses recherches. Des miARN ont été identifiés dans les exosomes et participent à la communication intercellulaire en ciblant les ARNm dans les cellules réceptrices. Certains miARN sont spécifiquement incorporés dans les exosomes dans certains cancers, dont ils constituent des marqueurs prometteurs.

Il n'est pas rare que les ARNm procaryotes et eucaryotes possèdent des structures secondaires et tertiaires qui régulent la transcription (notamment la terminaison de la transcription bactérienne) et la traduction (principalement l'étape d'initiation). Ces motifs, et particulièrement les riboswitches qui répondent à des variations de concentration de leur ligand, sont récemment devenus des outils de choix en biologie synthétique. Les motifs régulateurs sont particulièrement fréquents et variés dans les virus dont le génome est constitué d'ARN : en plus de la traduction (voir la diversité des IRES viraux), ils régulent une variété de fonctions dont la réplication du génome, sa maturation (épissage, polyadénylation) et son export du noyau cellulaire (CTE rétroviral) et constituent des cibles potentielles pour des approches antivirales.

B. Structure des ribonucléoprotéines et des ARN : évolutions récentes et enjeux méthodologiques

Les développements de la cryo-ME ont permis de faire des avancées spectaculaires dans l'analyse de la structure tridimensionnelle à haute résolution de certaines ribonucléoprotéines

téines. Ainsi, des structures à haute résolution des ribosomes bactériens, eucaryotes, mitochondriaux et de parasites sont maintenant disponibles. Les structures de divers complexes d'initiation de la traduction non canonique (IRES) et du ribosome avec plusieurs partenaires impliqués dans la traduction ont été obtenues, de même que celles de ribosomes « en hibernation ». Ceci devrait permettre le développement de nouveaux inhibiteurs de la traduction bactérienne. En outre, des structures de ribosomes en cours d'assemblage sont maintenant disponibles et permettent de comprendre les contrôles de qualité mis en jeu et les mécanismes de compaction de l'ARNr au cours de ces étapes. À côté des ribosomes, l'étude structurale du spliceosome a récemment fait des progrès remarquables et des structures en cryo-ME de la presque totalité des complexes impliqués dans les différentes étapes de l'épissage ont maintenant été obtenues. Cependant, la plupart des ribonucléoprotéines et des ARN se prêtent encore mal à l'analyse par cryo-ME à cause de leur flexibilité extrême.

Lorsque les données à haute résolution font défaut, les approches biochimiques couplées au séquençage à haut débit, et en particulier la cartographie chimique de l'ARN, pour laquelle des sondes traversant les membranes des bactéries, des cellules eucaryotes et des virus ont été développées, restent des techniques de choix. Les pontages couplés au séquençage à haut débit, bien que moins résolutifs permettent d'identifier les régions de l'ARN en interaction. Les défis à relever par ces méthodologies sont l'analyse structurale des populations d'ARN lorsque plusieurs structures coexistent et l'augmentation de leur sensibilité, afin d'étudier des ARN peu exprimés ou des structures minoritaires. Cette augmentation de sensibilité est aussi un objectif majeur pour l'imagerie des ARN dans les cellules fixées et surtout vivantes. Dans ce dernier cas, le développement de nouveaux outils ne requérant que des modifications limitées de la séquence des ARN d'intérêt constitue un enjeu de premier ordre. Les développements importants de la spectrométrie de masse bénéficient aussi à l'étude des ARN et des ribonu-

cléoprotéines, d'une part en permettant l'identification des protéines associées aux ARN et d'autre part en permettant l'analyse des nucléotides modifiés de l'ARN avec une grande sensibilité.

C. Nucléotides modifiés des ARN : l'épitranscriptomique, un nouveau champ d'investigation

L'étude des nucléotides modifiés dans les ARNt a donc pris récemment un nouvel essor grâce aux évolutions de la spectrométrie de masse et du séquençage à haut-débit. L'analyse comparative de l'ensemble des nucléotides modifiés des ARNt chez plusieurs organismes devient progressivement réalité et devrait permettre de mieux comprendre leurs rôles dans la stabilité des ARNt, le décodage fin de l'information génétique et l'adaptation des cellules aux différents stress.

Par ailleurs, jusque récemment, les ribosomes étaient considérés comme des exécutants, traduisant les ARNm disponibles en protéines dès l'instant où les acides aminés étaient suffisamment abondants. Il apparaît aujourd'hui que le ribosome est un acteur direct du contrôle traductionnel. La notion de ribosome spécialisé est en train d'émerger. Cette spécialisation va dépendre des protéines associées au ribosome, des modifications post-traductionnelles de ces protéines mais aussi des modifications de nucléotides sur l'ARNr. Ces nucléotides modifiés des ARNr des ribosomes humains peuvent être visualisés par cryo-ME, ce qui permet d'expliquer leurs rôles structuraux et fonctionnels. L'étude de ces ribosomes spécialisés, impliqués dans la régulation de différents processus cellulaires, n'en est qu'à ses débuts mais ils viennent d'être mis en cause dans l'initiation et la progression tumorale. Leur caractérisation devrait donc aboutir à de nouvelles découvertes fondamentales et appliquées dans les années à venir.

Enfin, l'évolution récente majeure concernant les modifications de l'ARN est la découverte que de nombreux ARNm contiennent des modifications telles que m⁶A, m¹A, m⁵C, I ou Ψ, qui sont le plus souvent incorporées en réponse à divers stress. La modification la plus étudiée, m⁶A est dynamique : elle est ajoutée et enlevée grâce à des enzymes spécifiques et recrute des protéines qui régulent, entre autres, l'épissage alternatif, la traduction et la stabilité des ARNm. Lorsque les ARNm contiennent plusieurs résidus m⁶A, certaines protéines cytosoliques induisent des séparations de phases – cf. V. – créant des compartiments sans membranes tels que les P-bodies, les granules de stress et des granules d'ARN neuroaux.

Il ne fait aucun doute que nous n'avons fait qu'effleurer la complexité de l'épitranscriptome qui ajoute un nouveau niveau de régulation à l'expression des gènes avec des retombées importantes attendues en biologie-santé.

IV. Glycanes et glycosylation

La glycosylation produit une classe de biomolécules, très abondantes et caractérisées par une extraordinaire diversité. Les glycanes sont pourvoyeurs d'une densité d'information biologique considérable. À l'ère post-génomique, la glycomique, qui vise à établir l'entièreté du répertoire des glycanes d'une entité biologique (cellule unique, tissu ou organisme dans une situation physiopathologique donnée), et le déchiffrement du glycode (information biologique reçue et envoyée par les glycanes) sont parmi les enjeux majeurs de la biologie du XXI^e siècle.

La glycobiochimie a aussi de nombreuses retombées applicatives en biotechnologie (agriculture, industrie du bois et du papier, agroalimentaire, biomatériaux, etc.) et pharmacologie (vaccins et antibiotiques). De multiples principes actifs de plantes sont des molécules

glycaniques avec des applications potentielles dans le domaine des maladies infectieuses et du cancer. Ainsi, les glyco-actifs et les molécules ciblant les interactions protéine-sucres représentent une nouvelle génération de médicaments, notamment dans le domaine des anti-infectieux, qui pourraient apporter des réponses dans la lutte contre les résistances.

Les glycanes sous toutes leurs formes (i.e. sucres simples, polymères, glycoconjugués dans les glycoprotéines, protéoglycanes, glycolipides), sont historiquement connus comme fournisseurs d'énergie et pour leur rôle architectural tant au niveau de la paroi des végétaux que dans les tissus conjonctifs des animaux. Cette dernière décennie est surtout marquée par la découverte de la capacité fascinante des glycanes à élaborer un langage biologique sophistiqué. Celui-ci régit les mécanismes de communication entre cellules, entre les cellules et leur environnement et entre différents compartiments cellulaires.

Au niveau de la cellule et de l'interface cellule-matrice extracellulaire, il est de première importance d'appréhender les rôles des glycanes dans le repliement et la dynamique des protéines, les mécanismes de reconnaissance intercellulaire et hôtes-pathogènes, la régulation de la transduction du signal par les récepteurs à tyrosine-kinase et les protéoglycanes, la gouvernance des régulations épigénétiques et transcriptionnelles (par O-GlcNAcylation par exemple).

La synthèse des glycoconjugués fait intervenir l'action finement régulée des CAZymes (carbohydre-actives enzymes) qui gouvernent l'expression du répertoire de sucres dans un glycome donné. L'étude de ces CAZymes représente tout un pan de la glycobiochimie dans laquelle la France bénéficie d'une reconnaissance internationale élevée mais fragile, basée sur la renommée de laboratoires individuels dont certains assurent le maintien et la mise à jour de la banque CAZymes qui sert de référence à la communauté internationale.

Les progrès en glycobiochimie, tant au niveau de leur connaissance fondamentale que de leurs applications, sont retardés par une boîte

à outils incomplète pour la détermination de la composition chimique et de la structure des glycanes, des glycoconjugués et des complexes protéines-glycanes. Le développement de méthodes pour la détection, l'imagerie, la séparation et la détermination de la structure 3D des glycanes à haute résolution est un objectif à atteindre dans les dix prochaines années. Ces méthodes devront être accessibles aux laboratoires non spécialisés si on veut développer une glycobiologie véritablement intégrative. Des avancées technologiques sont tangibles mais elles tardent à entrer dans l'usage courant.

En premier lieu, l'analyse de la structure primaire des glycanes reste un défi dû à la diversité des monomères de sucres et de leurs liaisons entre eux. La détermination de l'isomérisation des sucres est aussi un challenge. Le séquençage des glycanes s'appuie sur l'utilisation systématique de lectines couplées à des enzymes hydrolytiques et de la spectrométrie de masse. Des techniques innovantes, telles que le couplage de la spectrométrie de masse et de la spectrométrie laser (combinant l'analyse simultanée de la masse et des vibrations permettant une signature bidimensionnelle de la structure d'un saccharide) semblent prometteuses. L'objectif est de parvenir à déterminer la structure de n'importe quel glycanes ou glycoforme de glycoprotéine dans tout échantillon. Pour l'analyse de la structure 3D, compliquée par la flexibilité conformationnelle des sucres, la RMN reste la technique de choix qui doit être couplée à des approches de modélisation, notamment faisant appel à la dynamique moléculaire, qui restent un challenge sur ce type de molécules (cf. II.A).

En glycomique, les techniques de glycoarrays sont en plein développement et sont en train d'apporter des avancées spectaculaires. À l'aide de lectines ou d'anticorps greffés sur des puces, ces techniques permettent de cribler des glycoconjugués marqués par fluorescence au sein d'un échantillon. Sous forme de glyco-arrays, elles permettent de cribler les interactions protéine-sucres. La France est clairement en retard dans l'implémentation de ces techniques qui pourtant, combinées aux autres

« omiques », devraient apporter des résultats importants.

De façon complémentaire, il faudra développer des outils pour manipuler les glycanes, telles que les enzymes (CAZymes), natives ou modifiées par ingénierie, ainsi que celui d'inhibiteurs qui permettent de modifier des voies métaboliques et d'en appréhender les conséquences *in cellula* ou *in vivo* dans des stratégies de chemobiologie. Dans ce domaine, l'utilisation de précurseurs de sucres non naturels couplés à la chimie click est particulièrement intéressante pour la détection *in cellula* des glycoconjugués.

Deux domaines connexes situés à l'interface de la section 20 et d'autres sections sont indispensables à développer. Tout d'abord, la recherche sur les glycanes se heurte à l'accès limité aux sucres de structure définie. Il est absolument nécessaire que les glycobiologistes et toute la communauté puissent disposer dans un futur proche de glycanes simples et complexes à des fins de standard et d'outils d'analyses. Cet objectif peut être atteint par des efforts importants en chimie de synthèse ou synthèse chimio-enzymatique, qui requiert des compétences dédiées. Ensuite, la glycobiologie doit s'adapter à l'augmentation considérable des données scientifiques et à leur complexité. L'information sur les glycanes n'est actuellement pas encore accessible de façon fluide. La création d'une banque centralisée apparaît donc indispensable.

Un enjeu majeur est d'intégrer définitivement les glycosciences dans la biologie « classique ». Pour cela, il est indispensable d'inclure l'apprentissage des glycanes dans le curriculum des biologistes et des acteurs biomédicaux au même titre que celui des acides nucléiques et des protéines.

La glycobiologie en France s'appuie sur une communauté soudée, dynamique et bien structurée. Différents laboratoires ont contribué à l'établissement du glycome d'organismes modèles. Cependant, les verrous technologiques à faire sauter sont complexes et cette communauté doit être soutenue. En ce sens, il serait important de promouvoir la formation

d'un réseau français d'expertise en glycobio-
logie pour mettre en place une structure opéra-
tionnelle (de type Infrastructure de Recherche)
interdisciplinaire capable de répondre aux
demandes d'analyses, de développements
technologiques et de formations des laboratoi-
res. La France pourrait ainsi conserver une
place de leader (5^e au niveau mondial après
les USA, le Japon, le Royaume Uni et l'Alle-
magne pour les publications en glycobio-
logie), sortir cette discipline de l'isolement pour
qu'elle irrigue l'ensemble de la communauté
scientifique.

V. Des enzymes au métabolisme

Les enzymes constituent une classe de pro-
téines d'un intérêt particulier. Au-delà des
études permettant une vision intégrée de la
structure des enzymes, de leur dynamique et
de leur fonction, l'enjeu majeur pour les
années à venir porte sur le décryptage des
réseaux métaboliques auxquels elles partici-
pent, leurs interactions, ainsi que sur notre
capacité à modéliser et prédire leur comporte-
ment.

La mise en évidence récente d'un nombre
élevé de protéines multifonctionnelles ou de
complexes transitoires souligne l'importance
de ces enjeux dans la compréhension du fonc-
tionnement des cellules. Il convient donc d'in-
tégrer nos connaissances moléculaires à
l'échelle supérieure et de mieux appréhender
comment se forment et se régulent ces réseaux
métaboliques. Les questions liées à l'organisa-
tion et la compartimentation cellulaire, à
l'émergence de complexes métaboliques
(métabolons) stables ou transitoires et à l'exis-
tence de compartiments métaboliques non
membranaires (compartiments protéiques et
séparation de phases – cf. VI – dans lesquels
le rôle des IDP – cf. II.B –, véritables nœuds

métaboliques, reste à explorer.) doivent être
envisagées à toutes les échelles du vivant.

Il s'agira notamment de comprendre com-
ment, à l'échelle moléculaire, les variations de
structure des enzymes individuelles ou les
modes d'assemblage des complexes multi-
enzymatiques modifient les flux métaboliques,
et de remonter progressivement vers l'échelle
cellulaire de ces phénomènes jusqu'à l'analyse
détaillée de la répartition en fonction du temps
des macromolécules, au sein (ou non) de
complexes stables ou transitoires, et des méta-
bolites dans les différents compartiments cellu-
laires.

Il faudra mettre en place des approches
analytiques quantitatives dépendant d'outils
physiques de mesure destructive (spectromé-
trie de masse, imagerie par spectrométrie de
masse, techniques omiques sur cellules indivi-
duelles, microscopie électronique) ou non des-
tructive (RMN *in vivo*, mesure de fluorescence
en cellule unique ou en comptage) pour obte-
nir une quantification et une localisation précises
des différents métabolites et ainsi construire
des cartes de flux métaboliques. Enfin, si on
souhaite être capable de prédire le comporte-
ment métabolique cellulaire, une intégration
de ces données dans des modèles mathéma-
tiques (qui restent à développer) sera néces-
saire. Il faudra aussi se doter d'outils
permettant d'approcher au mieux les paramè-
tres enzymatiques directement dans la cellule,
dans un contexte métabolique donné, patho-
logique ou même synthétique, afin de complé-
ter la somme de données acquises *in vitro*.

Au sein des métabolismes, celui en lien
avec la production d'énergie, reste en perpé-
tuelle évolution. Ce domaine associe toutes les
composantes de la biologie et de la chimie. Des
travaux sont indispensables pour comprendre
comment à l'aide de modules *a priori* identi-
ques, la nature arrive à produire et consommer
de l'énergie à partir de sources extrêmement
diverses.

La grande variété et la flexibilité des méta-
bolismes terrestres reflètent la variabilité
spatiotemporelle de l'environnement géochi-
mique sur fond duquel la vie a évolué. La

mise en évidence de la biodiversité, ainsi que le décryptage des métabolismes fondamentaux, des mécanismes d'adaptation et de résistance des micro-organismes aux conditions extrêmes sont des enjeux importants pour les sciences du vivant. Ils peuvent également être la source d'applications biotechnologiques essentielles, comme la recherche de nouvelles sources d'énergie (bio-conversions, biomasse, production de biogaz et d'hydrogène, etc.) ou celle de meilleures conditions du développement durable (bioremédiation, interactions bactéries/environnement, etc.). Ces connaissances permettront enfin de mieux appréhender les effets à long terme de la dégradation anthropogénique actuelle de la biodiversité.

L'identification de nouveaux systèmes moléculaires et métaboliques doit permettre de progresser dans la recherche de corrélations et similitudes entre des voies bioénergétiques apparemment différentes et de mieux comprendre, entre autres, la transition évolutive procaryotes/eucaryotes. Pour cela, notre capacité à réinterpréter les données génomiques à la lumière des métabolismes alternatifs sera décisive. À l'heure actuelle, l'annotation fonctionnelle sur la base des séquences reste incomplète, notamment à cause de la difficulté d'analyser des fonctions enzymatiques dans des systèmes à haut débit. L'enjeu est donc d'aller plus vite et plus efficacement du gène à la fonction de l'enzyme. Il est évident que ce type de caractérisation passera par des analyses directement *in vivo*, seules capables d'automatisation et miniaturisation suffisantes pour assurer le débit nécessaire permettant de suivre l'augmentation des données génomiques.

VI. Compartimentation non membranaire

La compartimentation de la cellule eucaryote est en train de vivre une révolution dont on peut penser qu'elle sera aussi féconde

que celle des ARN non-codants au tournant du millénaire. Dans le cytoplasme et à l'intérieur du noyau, un nouveau type d'organites a été mis en évidence. Ces organites, dépourvus de membrane, étaient pour certains identifiés depuis longtemps mais c'est seulement très récemment qu'on a caractérisé leur nature physico-chimique. Ces organites ont des propriétés liquides et sont formés par séparation de phase. Ils sont associés à des fonctions cellulaires essentielles : nucléoles dans lesquels se déroule la synthèse des ribosomes, nuclear speckles associés à l'épissage des ARNm, corps de Cajal impliqués dans l'assemblage des snRNP – pour ceux qui se situent dans le noyau – ; granules de stress ou P-bodies séquestrant les ARNm et régulant leur traduction, compartiments dédiés à la production de métabolites secondaires chez les plantes – pour ceux qui sont localisés dans le cytoplasme –.

Les organites liquides sont beaucoup plus dynamiques que les organites membranaires. Très sensibles à leur environnement physico-chimique, ils s'assemblent et se désassemblent en l'espace de quelques secondes. Ils sont très fortement enrichis en certaines protéines (spécifiques de l'organite) ou en métabolites particuliers. Ils peuvent aussi contenir des sous-compartiments formés par la coexistence de phases liquides non miscibles. Certaines de ces phases peuvent être constituées de mélange de sucres et/ou d'autres molécules conduisant à la formation de liquides ayant des propriétés de solvants eutectiques.

Comme indiqué précédemment, les protéines contenant des domaines intrinsèquement désordonnés semblent jouer un rôle clef dans la formation de ces organites qui contiennent par ailleurs très souvent des ARN et des protéines liant ces derniers.

Cette compartimentation originale pose des questions nouvelles. Il faudra identifier les interactions faibles qui maintiennent la cohésion de ces organites. Elles semblent impliquer les domaines intrinsèquement désordonnés mais aussi résulter des propriétés de synthèse d'enzymes associées à la production de métabolites secondaires. La RMN et le FRET sur

molécule unique ont là de nouveaux objets d'étude. Il faudra aussi caractériser le protéome et la composition en ARN de chacun de ces organites et distinguer les protéines ou les ARNs à l'origine de la séparation de phase, ceux qui se retrouvent dans l'organite à cause de leurs propriétés physico-chimiques et enfin ceux qui y sont parce qu'ils lient une protéine du type précédent. Il faudra identifier les maturations post-traductionnelles qui régulent la formation de ces organites. Enfin, il faudra recenser ces organites. Comme certains de ces organites pourraient avoir des tailles inférieures à 200 nm ou bien être détruits par les techniques de fixation cellulaire, il est possible que seuls les plus gros et les plus stables d'entre eux aient été identifiés. Il est d'ailleurs fort probable que ces nouveaux compartiments, essentiellement mis en évidence chez les eucaryotes, soient également présents chez les bactéries et les archées.

Cette compartimentation est un changement de paradigme qui va changer la vision de la signalisation et du métabolisme au sein de la cellule – on le voit déjà poindre dans le domaine de l'immunité innée et dans le domaine de la production de métabolites secondaires des plantes –. Il ne fait guère de doute qu'elle aura aussi un impact majeur dans les domaines de la transcription, de l'organisation et du maintien de l'intégrité du génome et de la division cellulaire.

Cela va aussi modifier notre façon de penser l'encombrement moléculaire et devrait nous permettre d'expliquer bien des paradoxes concernant la rencontre de deux entités cellulaires et *in fine* avoir un impact majeur en enzymologie et en biologie synthétique.

Les équipes relevant de la section 20 possèdent les outils pour s'attaquer à cette nouvelle problématique. Ces études devraient se développer en collaboration avec des équipes relevant de la section 22 mais aussi de la 21. Des études à l'interface avec les chimistes et les physiciens de la matière molle devraient également être très fructueuses.

VII. Micro-organismes et interactions hôtes pathogènes

A. Communauté bactérienne et microbienne

Les avancées sur le fonctionnement et la régulation des organismes complexes n'ont souvent été possibles que grâce à l'étude de microorganismes modèles, se développant en culture pure, dans des milieux bien contrôlés. La recherche en microbiologie prend actuellement un tournant sans pareil avec l'étude des microbiotes, à savoir l'ensemble des microorganismes (bactéries, microchampignons, protistes, virus, bactériophages) vivant dans un environnement spécifique chez un hôte ou en interaction avec une matière. Les microbiotes jouent des rôles divers, parfois clés, aussi bien au niveau de la planète (par exemple au niveau du cycle du carbone ou azote et au niveau de tous les écosystèmes) qu'à celui de l'Homme (par exemple dans l'obésité, la sensibilité aux infections, les pathologies inflammatoires et auto-immunes, etc.).

L'organisation et le fonctionnement du microbiote, aux capacités de résilience étonnantes, ouvrent donc un nouveau champ d'étude. De nouvelles approches sont nécessaires pour lier les études moléculaires aux phénotypes observés à l'échelle des microcommunautés. Il faudra pour cela développer une approche interdisciplinaire associant biologie, physique, chimie, mathématique et intégrer la dimension multi-échelle, afin de comprendre l'émergence de propriétés au niveau populationnel, d'en exploiter les potentialités et ainsi répondre à des problématiques sociétales dans le domaine de la santé, de l'énergie ou de l'environnement.

Le séquençage haut débit a permis de montrer la très grande diversité en espèces de ces

microbiotes. Par exemple, plus de 1 000 espèces bactériennes différentes constituent le microbiome humain et le microbiote intestinal contiendrait à lui seul 3,3 millions de gènes codant pour des protéines uniques (à comparer aux 23 000 gènes de l'Homme). Le microbiote humain n'inclut pas seulement des bactéries, mais aussi des archées, des virus (majoritairement des bactériophages), des protistes et des microchampignons et la recherche sur ces autres organismes au sein des microbiotes a été beaucoup moins poussée. Enfin, le microbiote est spécifique à chaque individu et, contrairement au génome, il varie en fonction de facteurs environnementaux (nutrition, antibiotiques, hygiène) et est dynamique au cours de la vie.

Les challenges pour les années à venir concernant les microbiotes sont nombreux. Il s'agira d'analyser la diversité couverte par le génome microbien, le transcriptome, le protéome, et le métabolome. Ceci conduira à des quantités importantes de données expérimentales bien supérieures à celles qu'on peut traiter actuellement. Caractériser le protéome et le métabolome de milliers de microbiotes impliquera de développer des outils informatiques de stockage (base de données) et des logiciels afin d'accroître nos capacités d'analyse et d'intégration de ces données issues des approches haut débit. Pour comprendre le rôle de tous ces gènes dans les processus biologiques des organismes et synthétiser les données dans des modèles prédictifs, il faudra aussi développer des approches innovantes permettant d'identifier des protéines spécifiques et les activités biologiques et métaboliques associées. Étudier ces microbiotes impliquera également de savoir les manipuler pour tester leurs fonctions, évaluer leur impact et ultérieurement contrôler leurs activités. Il faudra donc réussir à reconstituer ces communautés microbiennes pour étudier les interactions entre leurs membres et développer de nouveaux modèles expérimentaux afin de décrypter les mécanismes moléculaires sous-jacents.

Ces communautés bactériennes où les bactéries se développent au sein de consortia multicellulaires (uni-espèces ou multi-espèces)

structurés et différenciés conduisent au concept de «méta-organisme» et constituent de nouveaux modèles d'étude pour comprendre comment dans l'espace et dans le temps des milliers de cellules coopèrent, et participent au fonctionnement de la communauté. Le comportement d'un microbiote n'est pas la somme des comportements individuels et reste pour l'instant peu prévisible. Il conviendra de développer une vision intégrative permettant de relier les échelles, de la molécule à la cellule et de la cellule à la communauté afin de modéliser le fonctionnement de ces communautés à toutes les échelles spatio-temporelles. Imager les microbiotes est un défi et des outils devront être développés pour manipuler ces échantillons (épais, opaques, pouvant inclure des tissus) et les visualiser en 3D et en temps réel. Les avancées récentes en spectrométrie de masse avec en particulier le développement de sources de type nano-SIMS (secondary ion mass spectrometry) permettront aussi des avancées dans ce domaine. Cette technologie d'imagerie moléculaire permet de réaliser des analyses avec une résolution spatiale allant jusqu'à 50 nm et ainsi de détecter, localiser et analyser la métabolisation de composés à l'échelle de la cellule procaryote. L'imagerie par spectrométrie de masse pourrait, en complément des analyses de type «omiques» *in situ*, permettre d'étudier les dialogues moléculaires au sein du microbiote qui en impactent la dynamique. Dans ce contexte, un autre challenge sera aussi d'identifier et caractériser la matière noire des microbiomes (99% des micro-organismes ne peuvent pas être cultivés).

Dans le contexte médical, avec l'accélération alarmante de l'apparition de souches multi-résistantes aux antibiotiques qui laisse présager un manque crucial d'antibiotiques efficaces dans un futur proche, la connaissance des relations hôtes-pathogènes reste un enjeu majeur pour le développement de stratégies thérapeutiques et vaccinales. La compréhension au niveau moléculaire des mécanismes infectieux constitue un outil puissant pour la mise en place d'approches thérapeutiques et préventives ciblées et doit rester une priorité. Par ailleurs, les relations entre hôte et microbiote commencent à être explorées et révèlent

des processus biologiques complexes impliqués dans de nombreuses pathologies. De même, peu de choses ont été étudiées sur l'effet de la réponse de l'hôte (animal ou plante) sur ce consortium très dynamique de microbes. Décoder les mécanismes à l'origine de la stabilité des microbiotes chez les sujets sains, devrait permettre d'identifier les causes de maladies associées aux microbiotes et donner lieu à de nouvelles applications thérapeutiques.

Le microbiote environnemental mérite également une grande attention. Associé aux grands cycles géochimiques et d'un grand potentiel applicatif dans le domaine de l'énergie (dégradation de la biomasse, production de biofuels), de l'agriculture (rhizobiotes positifs) et de l'environnement (biodépollution, biolixiviation), il convient d'appréhender son fonctionnement fin et de faire le lien entre les grands principes décrits par les écologues (coopération, prédation, mutualisme...) et le sens et la régulation de ces principes au niveau métabolique. Ainsi, le rôle des interactions métaboliques dans la résilience des systèmes, les bases moléculaires de la communication au sein des microbiotes et leur régulation reste un vaste champ à investiguer.

B. Virus

Au-delà de leur impact en santé publique et au niveau économique, les virus sont des objets biologiques présentant des propriétés remarquables. D'une part, les interactions qu'ils doivent établir avec leur hôte permettent l'investigation de nombreuses fonctions cellulaires. D'autre part, leurs extraordinaires capacités adaptatives dues à leur nombreuse progéniture et à la faible fidélité de leurs répliques (en particulier chez les virus à ARN ou les rétrovirus) sont à l'origine de l'émergence de mécanismes enzymatiques originaux et de fonctions nouvelles. Enfin, leurs capacités à intégrer de nouveaux gènes ou à en transférer vers leurs hôtes constituent des moteurs majeurs de l'évolution et en font des outils très puissants en biotechnologie.

Un grand nombre de fonctions cellulaires, dévoyées par les virus, ont été identifiées depuis plusieurs années. Ici, le challenge n'est généralement plus l'identification des couples protéine virale/protéine cellulaire à l'origine de ces interactions mais plutôt la description fine des mécanismes permettant ces détournements de fonctions. C'est ainsi le cas pour le dévoiement des récepteurs et des mécanismes d'endocytose cellulaires lors de l'entrée, l'exploitation du cytosquelette et des moteurs moléculaires lors du transport intracytoplasmique des particules virales ou de leurs composants, etc. Il apparaît d'ailleurs que même au sein d'un genre ou d'une famille virale, les bases moléculaires de ces détournements présentent une grande diversité qui reflète encore une fois les capacités adaptatives des virus.

De nouvelles interactions entre les virus et leurs hôtes ont été identifiées plus récemment. On mentionnera la découverte des usines virales, c'est-à-dire de compartiments viraux formés dans la cellule et abritant certaines étapes clés du cycle viral (synthèse des acides nucléiques, assemblage total ou partiel des particules). Ces compartiments sont très divers. Ils peuvent être associés à des membranes, voire entourés par elles. Ces membranes peuvent être elles-mêmes dérivées d'organites cellulaires (comme chez les virus à ARN positif) ou synthétisées *de novo* (chez certains gros virus à ADN). Ces usines peuvent aussi former des inclusions cytoplasmiques dépourvues de membrane et posséder des caractéristiques d'organites liquides (cf. VI). De façon générale, on connaît mal la nature précise et l'organisation de ces usines et encore moins les principes physicochimiques à l'origine de leur formation alors même qu'elles pourraient constituer de nouvelles cibles thérapeutiques dans des stratégies antivirales.

On mentionnera aussi la découverte de la capacité des virus à réorienter les grandes voies métaboliques à leur profit. Ceci ouvre un grand champ de recherche encore inexploré et devrait certainement avoir un impact en médecine.

On terminera ce panorama des interactions virus-hôtes en mentionnant les interactions complexes entre virus et immunité innée. De nombreux motifs moléculaires associés à l'in-

fection de virus et reconnus par des protéines senseurs ont été identifiés. Il est néanmoins très probable que d'autres motifs et d'autres senseurs restent à découvrir. L'initiation et la régulation fine des diverses cascades de signalisation menant à la synthèse d'interféron restent à caractériser au niveau moléculaire. De la même façon, de nombreux gènes induits par l'interféron ont été identifiés mais souvent la fonction de leur produit reste inconnue. Parmi ceux-ci, de nouveaux facteurs de restriction de la réplication des virus sont régulièrement identifiés et leur étude apporte des informations importantes non seulement sur les virus mais aussi sur la cellule et met en lumière des stratégies originales de lutte antivirale. Finalement, les virus ont développé une batterie de contre-défenses qui neutralisent les acteurs de l'immunité innée. Nous ne connaissons encore qu'une toute petite partie de celles-ci et la façon dont elles agissent sur leur cible cellulaire.

Pour des raisons évidentes, la caractérisation des interactions virus-hôtes a surtout été menée chez des virus pathogènes pour l'homme ou les mammifères. Ces interactions ne sont donc quasiment pas étudiées pour la plupart des espèces virales. Il en va ainsi des virus géants à ADN dont on ne connaît toujours pas la fonction d'environ 90% des gènes et qui constituent donc un réservoir de nouvelles fonctions à explorer. De même, elles commentent seulement à être explorées chez les bactériophages. L'identification de protéines phagiques interférant avec la bactérie pourrait permettre la mise au point de nouveaux antibiotiques ou au moins le développement de nouvelles stratégies antibactériennes.

La biologie structurale des virus a explosé ces dernières années. Elle a bien sûr bénéficié des avancées de la cryo-ME. La résolution des structures a beaucoup exploité les propriétés de symétrie des particules virales ou des sous-assemblages formés par leurs composants. Plus récemment, les techniques d'affinement focalisées ont permis de résoudre la structure des éléments ne suivant pas la symétrie générale de la particule virale. Un des défis reste néanmoins la détermination de l'organisation et de la structure du génome des virus (ARN ou ADN)

à l'intérieur des particules virales. Un autre est la détermination de la structure des capsides de virus géants dont la taille, trop importante, n'autorise pas l'utilisation de la microscopie électronique. Le développement de nouveaux microscopes électroniques à très haute tension (de l'ordre du million de volts) ou du XFEL pourrait combler cette lacune.

Un autre défi du domaine est celui de la caractérisation structurale et fonctionnelle des complexes impliqués dans la réplication virale. Ces complexes constitués de protéines multidomaines restent difficiles à exprimer et adoptent un grand nombre de conformations. Cette hétérogénéité conformationnelle ne facilite ni leur cristallisation, ni leur étude par cryo-ME. Par ailleurs, ils s'associent aux acides nucléiques ainsi qu'à de nombreuses protéines cellulaires. Même si des résultats remarquables ont été obtenus sur le complexe formé par la polymérase du virus de la grippe (dont la structure a été obtenue par des équipes travaillant en France), sur la polymérase d'un rhabdovirus (dont une structure a été déterminée par cryo-ME) ou bien encore sur la transcriptase inverse et l'intégrase du VIH, nous n'avons à l'heure actuelle qu'une compréhension limitée de la dynamique de ces complexes et de la façon dont ils fonctionnent en présence d'acides nucléiques. Ces complexes, dont les mammifères ne possèdent pas d'équivalent, constituent évidemment des cibles de choix pour des antiviraux.

VIII. Biologie intégrative

A. De la biologie structurale à la biologie structurale intégrative

Le nouveau défi de la biologie structurale est de déterminer l'organisation des complexes macromoléculaire dans leur environnement

naturel. La tomographie, les développements de la spectrométrie de masse, les microscopies optiques à super résolution et le CLEM (Correlative Light Electron Microscopy, combinant microscopie de fluorescence super résolue ou non et microscopie électronique) sont les techniques de choix qui doivent permettre d'avancer dans cette direction.

Il faudra aussi progresser dans notre capacité à caractériser la dynamique de ces complexes dans la cellule. Les techniques d'incorporation d'acides aminés non naturels dans les protéines ou de bases modifiées dans l'ADN, qui permettent le greffage covalent de sondes chimiques par chimie click et ainsi d'accéder aux paramètres structuraux et dynamiques des macromolécules, vont devenir incontournables. Par exemple, le greffage de fluorophores ouvre la possibilité de caractériser la dynamique de molécules uniques par smFRET ou de populations par spectroscopie de corrélation de fluorescence (qui donne accès à la concentration et la diffusion locales des complexes considérés) à la fois *in vitro* et *in vivo*. Le greffage de sondes radicalaires permet quant à lui d'envisager des études par résonance paramagnétique électronique *in situ*. La RMN cellulaire n'est pas en reste et il ne fait guère de doutes que de nouveaux développements dans ce domaine sont à attendre dans les prochaines années.

L'ensemble de ces techniques devrait permettre de comprendre le fonctionnement d'une protéine au sein de son réseau d'interaction, dans le contexte cellulaire et de façon résolue dans le temps.

B. Hétérogénéité cellulaire

La vision dynamique du fonctionnement des systèmes biologiques a amené à repenser l'hétérogénéité cellulaire comme un phénomène stochastique présentant un avantage adaptatif évident. La biologie intégrative doit donc maintenant se focaliser sur la cellule unique, dans les aspects omiques notamment.

Ce point est déjà partiellement acquis pour les analyses transcriptomiques et génomiques, mais reste encore difficile pour la protéomique et l'analyse métabolique.

De nouvelles questions apparaissent concernant la façon dont cette hétérogénéité est exploitée au niveau de la population par exemple dans des phénomènes de spécialisation/différenciation en son sein. Par ailleurs, de nombreuses expériences suggèrent que des mécanismes permettant de tamponner ou filtrer cette hétérogénéité ont été développés. Ceux-ci restent à découvrir.

La miniaturisation et la microfluidique sont évidemment les techniques de pointe pour résoudre ces questions, non seulement parce qu'elles permettent l'analyse de cellules individuelles mais aussi à cause de leurs grandes capacités de débit analytique. L'objectif de la vision intégrative est de passer progressivement de l'analyse d'un système biologique moyen (population) à la reconstruction d'un système par la somme de ses éléments (cellules). Ceci donnera une vision plus exacte du fonctionnement collectif et pourra notamment permettre de comprendre le rôle de l'hétérogénéité cellulaire dans l'émergence de propriétés au niveau populationnel.

En parallèle, il faudra construire des modèles des réseaux cellulaires, génétiques et métaboliques plus réalistes intégrant la vision nouvelle du fonctionnement de la cellule (cf. V, VI et VII.A). Ces modèles devront rendre compte des hétérogénéités populationnelles et des bifurcations que celles-ci sont susceptibles d'engendrer dans les phénotypes cellulaires. Ceci ne sera pas possible sans une véritable collaboration entre informaticiens, mathématiciens, physiciens et biologistes.

C. De nouveaux besoins

Le traitement des données omiques est déjà un enjeu crucial au sein de la communauté scientifique. La biologie des systèmes a un besoin encore plus grand d'interface avec la

bioinformatique, non seulement en termes de stockage d'information, mais aussi en termes de traitement de données (développements statistiques adaptés ou nouveaux modèles mathématiques). De grands volumes de stockage et de grandes puissances de calcul vont être nécessaires. Il conviendra de mener une réflexion sur le format des données qui, pour des raisons évidentes de partage au sein de la communauté scientifique, doit être pensé pour qu'elles puissent être exploitées de façon pérenne, utilisables par différents logiciels et échangeables entre communautés scientifiques. L'apport de l'intelligence artificielle et du machine learning sera déterminant dans l'analyse des énormes volumes de données expérimentales.

En conclusion, la biologie intégrative a besoin d'interface avec toutes les autres disciplines présentes au CNRS. Il y a aussi un besoin criant d'étudiants avec une formation dominante en biologie et une culture solide, allant au-delà du vernis, en modélisation, en mathématiques, en chimie et en physique.

IX. Biologie de synthèse

La biologie de synthèse vise à concevoir et construire des objets biologiques ayant des propriétés déterminées par son concepteur. Elle signe donc l'entrée de la biologie dans un monde classiquement réservé à l'ingénierie et dans lequel la construction d'objets présente un caractère prédictible. La biologie synthétique est par ailleurs complètement intriquée avec la biologie intégrative (biologie des systèmes), qui lui fournit les outils et concepts permettant de comprendre le fonctionnement d'un système biologique dans son ensemble.

La maîtrise de la construction de systèmes biologiques synthétiques a eu des répercussions immédiates dans le domaine des biotechnologies, plus particulièrement en ingénierie métabolique, avec la reconstruction de voies entièrement (bio)synthétiques produisant des

molécules naturelles difficilement accessibles par la chimie de synthèse ou par extraction (hydrocortisone, acide artémisinique, etc.). Cette forte intégration avec le domaine appliqué a intimement lié la biologie synthétique à la biotechnologie et la bioéconomie. Pour autant la biologie synthétique ne doit pas être confinée au seul domaine des biotechnologies, car, en créant des outils capables de modifier/perturber les systèmes vivants, elle a soulevé des questions extrêmement fondamentales sur les capacités adaptatives et évolutives du vivant. Ces outils font encore une fois la part belle à l'interdisciplinarité.

Plusieurs champs de la biologie synthétique rentrent dans les axes thématiques de la section 20, notamment l'ingénierie des biomolécules et l'ingénierie métabolique. Ils posent des questions essentielles sur les relations entre structure, dynamique et activités des macromolécules et leurs fonctions au sein de réseaux métaboliques ou cellulaires complexes (cf. V). La fonctionnalité de ces systèmes peut être analysée *in vitro* (cell-free systems) et/ou *in vivo* (souches recombinantes) grâce aux techniques de fonctionnalisation chimique spécifique.

Des développements spectaculaires ont également vu le jour en ingénierie rationnelle des molécules, notamment la conception de nouvelles protéines dont le repliement et la fonction sont préalablement déterminés mais aussi de sites catalytiques originaux capables de réaliser des réactions enzymatiques non présentes dans l'arsenal des enzymes naturelles.

L'utilisation d'acides aminés ou de nucléotides non naturels issus de la chimie ouvre aussi la voie à la construction de fonctions nouvelles dans le vivant : sites actifs ou de reconnaissance modifiés par des acides aminés non naturels, acides nucléiques catalytiques, etc. Ces approches nouvelles se développeront grâce aux avancées techniques dans d'autres domaines comme la chimie (synthèse de fonctions nouvelles, chimie au sein de mélanges complexes), la physique (microscopie, lasers, appareillage) et l'informatique (modélisation moléculaire, intégration des données).

La reconstruction métabolique est également un outil précieux de compréhension du métabolisme cellulaire. Même si son objectif final est souvent lié à la production de molécules, l'introduction de voies métaboliques synthétiques dans un organisme permet de définir les étapes limitantes dans la formation des précurseurs mais également dans la voie synthétique. L'analyse par les techniques omiques des perturbations métaboliques permet de mettre en évidence les différents types de contrôle exercés par la cellule, depuis la transcription jusqu'aux flux métaboliques et les interactions entre les différents réseaux métaboliques. L'ingénierie métabolique pose également de nombreuses questions fondamentales liant la biologie cellulaire et l'enzymologie au métabolisme. Ici encore, le souci d'amélioration de la production a conduit les chercheurs à travailler la compartimentation et la localisation des enzymes, voire même leur rapprochement physique par des techniques génétique (fusion de gènes, expression de domaines de recrutement). L'apport de la biologie structurale dans ce domaine (contrôle de l'architecture d'édifices macromoléculaires complexes, reconnaissance des interactions entre macromolécules, design et ingénierie moléculaire) est indéniable et restera déterminant dans les prochaines années.

Enfin, la biologie synthétique remet la compréhension des mécanismes enzymatiques au cœur du métabolisme. L'enzymologie bénéficiera des approches en biologie synthétique couplées à la biologie des systèmes, pour notamment revoir ou découvrir, avec une grille de lecture ciblée sur l'enzyme dans son contexte cellulaire, les mécanismes enzymatiques. Là encore, ces domaines de recherche devront trouver des chercheurs aux compétences multiples ou se construire *via* la collaboration entre biochimistes, biologistes structuraux, enzymologistes et biologistes cellulaires. Les avancées technologiques de la biologie des systèmes, poussant progressivement vers la miniaturisation et le haut-débit, devraient logiquement permettre d'intégrer ces données de fonctionnement enzymatique à l'échelle cellulaire.

La France, malgré un léger retard sur les autres pays européens dans la mise en place de programmes spécifiques pour la biologie synthétique, a su rebondir en créant, dès 2014, un GDR CNRS dédié à la biologie de synthèse et des systèmes. Il faut noter que de plus en plus de candidats se réclamant de cette discipline se présentent au concours CRCN en section 20. Ces candidatures dont le nombre augmente chaque année révèlent une appropriation des outils et concepts de la biologie synthétique dans le but de déchiffrer les mécanismes cellulaires les plus complexes. Le risque de voir la biologie synthétique comme uniquement destinée à promouvoir des aspects translationnels vers les biotechnologies (ce qu'elle fait également bien sûr) est donc maintenant écarté. Au même titre que toutes les disciplines scientifiques, la biologie synthétique trouve parfaitement son équilibre entre une recherche purement académique et un transfert technologique pour lequel elle a déjà amplement démontré son utilité.

Conclusion

L'évolution des grands questionnements sur le fonctionnement du vivant, le développement de méthodologies permettant de zoomer d'une cellule ou d'un système métabolique jusqu'à l'échelle atomique jettent les bases d'une nouvelle biologie, plus intégrative, interdisciplinaire et s'ouvrant entre autres à la physique, aux mathématiques et à la théorie des systèmes. Les chercheurs et les laboratoires de la section 20 sont déjà nombreux à se positionner sur ce front. Néanmoins, cette nouvelle frontière de la recherche en biologie demande des moyens humains et financiers plus importants que par le passé.

La France, qui était jusque très récemment bien positionnée dans le domaine de la biologie structurale, est en train de perdre son rang. On l'a mentionné : l'investissement dans les cryo-microscopes de dernière génération équival-

pés de caméras à détection directe a été insuffisant. Un plan national vise à rattraper ce retard. C'est une excellente chose, mais il ne faudrait pas qu'il s'exerce au détriment des autres équipements en imagerie (super-résolution, molécule unique), en biophysique ou en spectrométrie de masse. On soulignera ici que de nombreux pays européens, en particulier l'Allemagne et l'Angleterre, et la Chine investissent massivement dans toutes ces nouvelles technologies.

La section 20 couvre un vaste panel de thématiques et d'approches expérimentales. Le nombre de postes de chercheurs au concours est néanmoins faible. Il y a un risque non négligeable que certaines disciplines, anciennement bien implantées dans le paysage de la biologie française, voient leur effectif passer sous la masse critique. Pourtant, à côté des recrutements indispensables dans les domaines en plein essor que sont la cryomicroscopie et ses développements, la biologie intégrative ou la biologie de synthèse, il faut aussi maintenir des compétences dans des domaines moins à la mode mais dont la pertinence scientifique est intacte. Ainsi, l'expertise du biochimiste et de l'enzymologiste qui vont produire et caractériser des échantillons très homogènes, piégés à différents stades des processus biologiques, reste indispensable aux études structurales mais n'est plus suffisamment répandue. Trop souvent d'ailleurs, ce travail, ingrat et délicat, n'est pas reconnu.

Nous l'avons déjà dit, la biologie des systèmes, intégrative et synthétique se situe aux interfaces de plusieurs disciplines. Trop souvent, les étudiants issus d'un cursus purement biologique ont une culture insuffisante en mathématiques, en chimie et en physique qui ne leur permet pas d'aborder efficacement cette nouvelle biologie. Ceci nous invite à

repenser l'enseignement mais aussi à motiver les meilleurs étudiants, les plus aptes à appréhender la complexité et la richesse de la biologie intégrative, afin qu'ils s'orientent vers la recherche plutôt que dans des formations permettant d'accéder à des métiers plus lucratifs. La réévaluation du montant des bourses de thèse et du salaire du chercheur ainsi que de meilleures perspectives d'emploi pour les thésards (que ce soit dans le secteur privé ou dans la recherche académique) peuvent y contribuer.

Les approches haut débit, si riches en enseignements, ont aussi un coût non négligeable. Elles peuvent devenir difficiles d'accès à certaines équipes vu la faiblesse du financement récurrent et du taux de succès aux appels à projets de l'ANR (qui reste le seul guichet pour de nombreuses équipes dépendant de la section 20 impliquées dans une recherche fondamentale sans application médicale directe). Les périodes d'une voire quelques années sans réel financement ne sont pas rares, y compris pour des équipes leaders dans leur domaine, avec comme conséquence une perte parfois définitive de leur compétitivité au niveau international.

Face aux acteurs socio-économiques et politiques, nous devons donc réaffirmer l'importance de la recherche fondamentale. Il faut sans relâche expliquer d'une part que la recherche fondamentale d'aujourd'hui est nécessaire aux applications de demain et qu'elle seule est le garant de l'indépendance technologique de notre pays et, d'autre part, que dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de crise environnementale, limiter les enjeux fondamentaux de la biologie à ceux de la santé humaine serait une grave erreur.

ANNEXE 1

CLEM : *Correlative light electron microscopy*

Cryo-ME : *Cryo-microscopie électronique*

CTE : *Constitutive transport element*

IDP : *Intrinsically disordered protein*

IRES : *Internal ribosomal entry site*

miARN : *Micro-ARN*

SAXS : *Small angle X-ray scattering*

smFRET : *Single molecule fluorescence resonance energy transfer*

XFEL : *X-ray free electron laser*

SECTION 21

ORGANISATION, EXPRESSION, ÉVOLUTION DES GÉNOMES. BIOINFORMATIQUE ET BIOLOGIE DES SYSTÈMES

Composition de la section

Hugues ROEST CROLLIUS (président de section), Dominique WEIL (secrétaire scientifique), Julien BISCHEROUR, Déborah BOURC'HIS, Emmanuelle BOUVERET, Nathalie CAMPO, Karim CHEBLI, Sandra DUHARCOURT, Maryline FOGLINO, Patrick GARILIO, Corinne GREY, Aline HUBER, Romain KOSZUL, Ingrid LAFONTAINE, Emmanuelle LERAT, Giuseppina MARI, Olivier NAMY, Catherine Laure TOMASETTO, Marie VANDROMME, Chantal VAURY, Michel WERNER.

Résumé

La section 21 couvre des thématiques dont la dynamique s'est accélérée ces dernières années. Des transformations technologiques importantes ont notamment vu le jour dans le domaine des analyses 'omiques' en cellule unique, dans la démultiplication des techniques liées au séquençage de deuxième et troisième génération et dans les approches d'édition des génomes. Nous sommes en mesure d'explorer la biologie du génome sous des angles inédits, et surtout à une échelle encore inimaginable il y a peu. Cette situation

est un terrain fertile pour le développement de méthodes d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle en bioinformatique. Simultanément, nos connaissances ont réalisé de nombreuses avancées marquantes, que ce soit dans l'organisation 3D du noyau, la régulation épigénétique, les rôles et la régulation des ARN, ou dans l'émergence en biologie du concept de transition de phase, ou la variabilité génétique passée et présente du vivant. Face à ce paysage en évolution rapide les laboratoires doivent s'adapter, et ils ont pour cela besoin d'un soutien institutionnel fort.

Introduction

Le génome, son organisation et son expression sont par excellence des sujets de recherche à la croisée de très nombreuses disciplines. Une observation le traduit peut-être mieux que toute autre : la section 21 est l'une des deux sections du Comité National dont les candidats aux concours chercheur postulent le plus souvent dans une deuxième section (source S. Harrisson, 2019). Les avancées obtenues dans d'autres disciplines (biophysique, biologie cellulaire, évolution...) irriguent donc la recherche sur le génome. Réciproquement, les résultats obtenus sur la biologie de l'ADN et son expression alimentent de nombreuses autres branches de la recherche. Mais ce qui est vrai des avancées dans nos connaissances fondamentales l'est également des progrès technologiques : l'analyse des génomes bénéficie d'innovations obtenues dans sa propre communauté mais également dans de nombreux champs connexes. Ce rapport débute donc par ces nouveaux outils qui ont émergé récemment, car ils influencent profondément les questions actuelles et futures qui motivent nos recherches, et dynamisent des domaines dans lesquels des découvertes de rupture sont attendues. Les chapitres suivants couvrent différents domaines où la France est soit au premier plan, soit parfois très en retrait. Ils visent à mettre en relief les champs de la recherche qui méritent une attention particulière. Par choix, de nombreux autres domaines dans lesquels la communauté française tient son rang et participe activement à l'avancement des connaissances ne sont pas mentionnés. Enfin, le rapport se termine sur une observation concernant l'évolution du rapport entre les approches expérimentales et la biologie computationnelle, qui mériterait une réflexion au sein des sections du CoNRS, mais aussi plus largement au sein de l'INSB.

I. Nouvelles technologies

A. Génomique et épigénomique en cellule unique

Les approches de séquençage en cellule unique (« single cell » abrégé « sc ») permettent d'évaluer l'hétérogénéité des tissus ou des populations d'individus complexes ou disponibles en quantité limitée (gamètes, cellules souches), et de retracer des trajectoires développementales normales ou pathologiques. Le premier paramètre évalué en « single cell » a été le transcriptome, il y a près de 10 ans maintenant. D'une approche manuelle puis un peu plus systématisée (SMART-seq), la microfluidique ou la technologie droplet automatisent et standardisent aujourd'hui les procédures scRNA-seq, avec respectivement l'application Fluidigm et 10X Genomics, qui permet de traiter jusqu'à 10 000 cellules simultanément. Complétant le scRNA-seq et le sc-small RNA-seq, toute une gamme d'approches cellules uniques mesurent également les modifications de l'ADN (scRRBS, PBAT, TAPS), l'accessibilité de la chromatine (scATAC-seq), la position des nucléosomes (scNOME-seq), les modifications d'histones (scChIP-seq et CUT&RUN), et l'organisation tridimensionnelle du génome (schIC).

Selon une suite logique, les applications « single-cell » multi-omiques ont récemment vu le jour, permettant la détection simultanée de plusieurs molécules (ADN, ARN, protéines), pour une résolution non seulement précise mais aussi intégrée du fonctionnement d'une cellule. Par exemple, le noyau d'une cellule peut être isolé pour l'étude de son génome, de son méthylome ou de ses caractères chromatinien, tandis que le cytoplasme peut être utilisé pour analyser le transcriptome ou le protéome. Dérivant de ce principe, on peut citer des approches en duo telles que le scG&T-seq (Génome et Transcriptome), CITE-seq (Transcriptome et Proteome), scCOOL-seq (Position nucléosome et Méthylome), scMT-seq (Méthy-

lome et Transcriptome), voire en trio avec le scNMT-seq (Position Nucléosome, Méthylome et Transcriptome) et le scTRIO-seq (Méthylome, CNV et Transcriptome).

Enfin, de nombreux efforts sont actuellement déployés pour intégrer une information spatiale à ces approches « single-cell ». En effet, les étapes de dissociation nécessaires à l'isolement physique des cellules détruisent leur organisation spatiale. Déterminer l'identité transcriptomique ou encore épigénomique d'une cellule au sein d'un tissu ou d'un embryon intact, en relation avec sa position et son environnement (cellules voisines, capillaires sanguins, etc.) est un Graal incontestable. Dans ce sens, des approches quantitatives *in situ* sont en cours de développement, s'appuyant sur la détection voire la localisation simultanée de plusieurs transcrits par RNA-FISH en molécule unique (RNAscope), et utilisées en complément du scRNA-seq.

Un problème crucial auquel il faut faire face est celui de la gestion (temps de traitement et place de stockage) des données massives générées par ces approches cellules uniques, et de la disponibilité de méthodes analytiques bioinformatiques pertinentes. L'un des défis futurs, en particulier en médecine de précision, sera d'appliquer ces technologies cellules uniques (« single » ou multi-omique) à des tissus fixés et archivés en paraffine, tels que les biopsies de tumeurs. Paradoxalement, alors qu'on observe une utilisation croissante et même le développement de technologies « single-cell » (dont le scChIP-seq et le scHIC) dans les laboratoires français, ceux-ci sont peu représentés dans la course au développement de méthodes multi-omiques sur cellules uniques, qui requièrent il est vrai des supports financiers, structurels et humains importants.

B. Séquençage de troisième génération

Les méthodes de séquençage sont devenues de plus en plus rapides et moins coûteu-

ses, permettant le développement de nouvelles applications et méthodes ainsi qu'une augmentation exponentielle du nombre d'échantillons qui peuvent être analysés et, cela, selon des modalités diverses. Cependant, les méthodes classiques de séquençage présentent une limite située à quelques centaines de nucléotides de long et nécessitent pour l'analyse des ARN un passage par une étape de transcription inverse. Des méthodes (PacBio, Oxford Nanopore) ont récemment été développées pour des acides nucléiques, ADN ou ARN, longs de plusieurs dizaines de milliers de bases. Parmi elles, certaines sont capables de détecter les modifications du nucléotide lu, telle que la méthylation de l'ADN, ou des modifications post-transcriptionnelles de l'ARN comme le m⁶A, et ce directement, évitant ainsi de faire appel à une étape de modification biochimique dont le rendement ne saurait atteindre 100%. Ces méthodes présentent encore un fort taux d'erreur dans l'identification des bases et leurs modifications. Néanmoins, des progrès notables ont été réalisés et le séquençage long pourrait à terme remplacer le séquençage de seconde génération dans les applications ne nécessitant pas des débits extrêmes, une fois que les difficultés liées à l'identification précise des bases seront résolues. Un autre défi pour ces méthodes de séquençage tient au fait qu'elles ne sont pas encore adaptées à l'analyse de cellules uniques mais là aussi des développements sont en cours.

La capacité de ces méthodes à lire des molécules uniques de grande longueur et à détecter leurs modifications individuellement nous aide à comprendre le rôle de la méthylation de l'ADN et son hétérogénéité, ainsi que le mécanisme de la réplication des chromosomes. Au niveau de l'ARN, ces méthodes nous éclairent sur le rôle de l'épissage alternatif, sur l'importance des modifications post-transcriptionnelles, et la régulation de l'expression génétique. D'autres applications existent également dans le domaine du séquençage *de novo* de génomes où deux méthodes sont utilisées conjointement : le séquençage à très haut débit pour la construction de contigs, puis leur assemblage grâce à des lectures longues qui forment un squelette. La capacité à lire des séquences sur

de grandes distances permet par ailleurs l'assemblage précis de génomes contenant une forte proportion d'éléments répétés. Ceci a permis de corriger la séquence de plusieurs génomes de référence dont celui du génome humain et d'analyser la séquence de leurs télomères.

Enfin, des méthodes basées sur le séquençage long sont développées pour analyser la structure tridimensionnelle des génomes permettant de capturer l'ensemble des contacts dans lesquels une molécule particulière est engagée et donc, d'apprécier la variabilité des contacts de cellule à cellule.

C. Ingénierie du génome et de l'épigénome

La répression ciblée de l'expression de gènes endogènes par interférence ARN a constitué un progrès majeur. Plus récemment, l'édition ciblée de l'ADN par les outils dérivés du système de défense bactérien CRISPR-Cas9 a provoqué une véritable révolution en biologie, avec la possibilité de supprimer, remplacer ou insérer des fragments d'ADN de manière précise selon une « cuisine » moléculaire simple. Les implications développementales ou pathologiques peuvent être testées *in vivo*, sur modèles animaux ou végétaux. S'ouvre également la perspective de thérapies géniques chez l'homme, avec les débats éthiques nécessaires sur ses applications dans l'embryon. En effet, les modifications génétiques induites par CRISPR-Cas9 sont irréversibles, et surtout, sont potentiellement héréditaires si la modification atteint l'ADN de la lignée germinale.

D'autres outils CRISPR ont récemment vu le jour, qui eux permettent de modifier le niveau d'expression ou la séquence exprimée d'un gène de façon transitoire ou réversible, sans altérer la séquence d'ADN. Ainsi, le système CRISPR-Cas13 permet de cibler non pas l'ADN mais l'ARN. De nombreux efforts sont déployés avec ce nouveau système pour des

approches « knock-down » de transcrits, pour corriger des ARN mutés ou encore pour marquer et visualiser des ARN, notamment par imagerie en temps réel. D'autre part, l'activité de clivage de Cas9 peut être détruite (« dead Cas9 », dCas9), tout en conservant ses propriétés de ciblage à façon par des petits ARN guides. En fusionnant dCas9 à des inhibiteurs transcriptionnels tel que KRAB (CRISPRi) ou des activateurs transcriptionnels comme VP65 ou VPR (CRISPRa), on peut tester non seulement des pertes de fonction, par l'extinction d'un gène, mais également des gains de fonction, par surexpression ou expression ectopique d'un gène.

Selon ce même principe, l'épigénome peut aussi être modifié localement, par la fusion de dCas9 avec des enzymes de modification de l'ADN ou de modification post-traductionnelle des histones. Ainsi, il est maintenant possible de tester l'impact direct de la méthylation de l'ADN ou d'une modification d'histone sur un locus donné, plutôt que d'avoir à éliminer l'enzyme de modification et s'exposer ainsi à des effets pleiotropes et potentiellement confondants. Les outils CRISPR-Cas9 ont également été adaptés pour une utilisation en cribles génomiques, en version perte de fonction, CRISPRa ou CRISPRi. Ils sont aussi de plus en plus utilisés pour des approches protéomiques visant à étudier par spectrométrie de masse les protéines associées à une séquence d'ADN donnée, en combinaison avec des outils d'immunoprécipitation de la chromatine ou de biotinylation par proximité (APEX).

En principe, les ingénieries technologiques dérivées de CRISPR sont illimitées, nourries notamment par la découverte de nouvelles enzymes Cas avec des spécificités de reconnaissance inédites. De nouveaux outils d'édition épigénomique voient le jour avec une fréquence exponentielle : en principe, toute protéine du métabolisme de l'ADN ou de l'ARN peut être ciblée à façon, en fusion avec des versions inactives de Cas9 ou Cas13. Parmi les promesses les plus attrayantes, on peut mentionner :

– L'utilisation de CRISPRi ou CRISPRa *in vivo*, pour tester la fonction d'un ou plusieurs gènes, par exemple au cours du développement, pendant la tumorigenèse ou sur un destin cellulaire. Des modèles souris et drosophile exprimant CRISPR-Cas9 de façon tissu-spécifique (en combinaison avec le système CRE) sont déjà disponibles, la limite la plus flagrante étant le mode de délivrance des ARN guides.

– La modification de la structure tridimensionnelle du génome, en fusionnant la dCas9 avec l'agent insulateur CTCF ou en induisant une hétérodimérisation entre deux protéines liées à des sites distants et ainsi, la formation de boucles chromatiniennes.

– Le ciblage des processus d'épissage ou de modification des ARN, en utilisant une version inactive de Cas13.

– L'utilisation de l'outil CRISPR pour des approches de séquençage dirigé.

D. Intelligence artificielle et génomique

La génomique au sens large est une discipline classiquement basée sur l'acquisition de quantités massives de données, à partir desquelles des observations sans *a priori* sont susceptibles de mener à de nouvelles connaissances, hypothèses, relations et prédictions. Ce cadre se prête idéalement à l'application des techniques d'apprentissage automatique («machine learning»), dans lesquelles un algorithme d'apprentissage peut par exemple être entraîné à classifier des profils de descripteurs construits pour représenter des classes d'éléments à partir d'annotations fournies par les chercheurs. Depuis quelques années, les applications de l'apprentissage automatique se sont étendues à de nombreuses questions, en général liées à l'identification de propriétés des séquences d'ADN (sites d'initiation de la transcription (TSS), sites de régulation) et de fonctions par-

fois très précises (intensité d'expression des gènes, caractère pathologique de mutations). Une étape supplémentaire est actuellement en passe d'être franchie, grâce à l'application d'un type spécifique d'algorithmes permettant de réaliser de l'apprentissage «profond» («Deep Learning», DL). Ici, les chercheurs n'ont plus besoin de spécifier des descripteur pour construire une représentation des éléments à analyser: l'algorithme basé sur des réseaux de neurones profonds identifiera lui-même les descripteurs lui permettant de classer de manière optimale les éléments souhaités par l'utilisateur. Le «Deep Learning» nécessite des quantités massives de données mais des applications commencent à voir le jour. Par exemple des progrès importants ont été réalisés dans la prédiction d'interactions protéine-ADN. Plus récemment une équipe aux USA a développé un logiciel qui est capable de prédire l'intensité tissu-spécifique de l'expression d'un gène, avec une précision remarquable, et ce, simplement à partir de la séquence d'ADN autour de son promoteur. Ces approches nécessitent la mise en place de clusters de calculs dédiés, équipés de processeurs graphiques (GPU). Une branche particulière du «Deep Learning» à haut potentiel consiste à opposer deux réseaux de neurones afin de générer de nouveaux objets biologiques (des séquences d'ADN, de protéines, des réseaux, des images de cellules, etc.) indistinguables d'un objet biologique réel de la même classe. Ces algorithmes appelés «Generative Adversarial Networks» (GAN), voient de premières applications en génomique émerger. En France, plusieurs initiatives ont vu le jour visant à favoriser le développement de ces approches dites d'Intelligence Artificielle (IA) en biologie, à travers des partenariats privé-public, des opérations de mise en réseaux de laboratoires, des colloques, des programmes de financement. Elles doivent associer étroitement des biologistes, car l'expérience montre qu'une compréhension profonde des données biologiques utilisées et une maîtrise des concepts moléculaires sont indispensables à des applications fructueuses.

II. Expression et stabilité des génomes

A. Transitions de phase

Ces dernières années ont vu l'émergence d'un nouveau principe clé de l'organisation subcellulaire, celui des séparations de phase liquide-liquide. La capacité des protéines et des acides nucléiques de se condenser localement sous forme de gouttelettes liquides plus concentrées (plus visqueuses) que le cytoplasme ou le noyau environnant explique la formation d'un grand nombre de granules micrométriques observables en microscopie et dépourvus de membrane. On peut citer dans le noyau les nucléoles, corps de Cajal, speckles et paraspeckles, corps PML, mais aussi les foyers de réplication et de réparation. Dans le cytoplasme, on peut observer des P-bodies, granules germinaux et neuronaux, granules de stress, et plus récemment les usines de traduction. Ces séparations de phase pourraient aussi expliquer la formation des domaines chromatiniens et même la condensation des chromosomes. En réalité, elles ont lieu dès lors que des molécules sont capables d'établir des interactions multivalentes et de faible affinité, deux propriétés caractéristiques des complexes RNA/protéine et DNA/protéine.

À l'opposé des complexes cristallisables, comme les ribosomes, la compartimentation du contenu cellulaire par transition de phase conduit à des domaines de contenu extrêmement dynamique et régulé en fonction de l'environnement cellulaire. Il s'agit donc d'un regard très nouveau sur l'organisation du métabolisme cellulaire. Les prochaines années devraient permettre de comprendre la valeur ajoutée de ces domaines par rapport à une distribution diffuse de leurs constituants. Servent-ils à atteindre les concentrations moléculaires suffisantes pour certaines réactions enzymatiques? Ou au contraire à inhiber des

réactions dans un environnement similaire à un gel? Ou à isoler certaines molécules du contenu cytosolique? Ces questions sont centrales pour comprendre les mécanismes contrôlant l'expression des gènes et le maintien de l'intégrité du génome, et les laboratoires de biologie français ne doivent pas rester en retrait sur ces évolutions.

B. Variabilité génétique

La variabilité de l'expression génétique est au cœur de l'évolution des espèces car elle est le substrat de la sélection et la source de l'innovation. Cette idée n'est pas récente mais les moyens expérimentaux pour investiguer à quel point elle est importante et quels en sont les mécanismes manquaient jusqu'à présent, en particulier pour l'étudier chez les organismes pluri-cellulaires.

Notre compréhension de cette variabilité est aujourd'hui en plein bouleversement. Pour en saisir la raison, il est nécessaire de revenir sur la façon dont une variabilité, quelle qu'elle soit, est perçue expérimentalement. Il s'agit d'acquiescer un *grand nombre de fois des valeurs quantitatives* qui, dans une condition donnée, devraient être égales entre elles, puis d'estimer leur dispersion. Les technologies d'aujourd'hui révolutionnent cette perception. Tout d'abord par leur débit : Le *grand nombre de fois*, directement lié au nombre d'échantillons analysés lors d'une expérience, est en croissance vertigineuse. Ensuite par leur couverture : les *valeurs quantitatives* peuvent désormais être obtenues sur des milliers de macromolécules de nature différente (ARN, protéines et leurs modifications...), de caractères morphométriques (taille et forme des cellules...) et de multiples acquisitions spatiales et temporelles. Par ricochet, ce bouleversement technologique nous autorise à redéfinir le périmètre de la variabilité : ce qui était hier considéré comme un groupe homogène d'individus peut aujourd'hui être stratifié par mode de vie, sous-catégorie phénotypique ou génotypique, etc. De même, la notion de type cellulaire devient parfois floue face à l'hé-

térogénéité entre cellules individuelles. Il est devenu possible d'identifier les sources de variabilité (interactions gène-gène, gène-environnement, âge, effets transgénérationnels...), et même d'étudier la variabilité stochastique d'un paramètre (sans source déterministe) qui est elle-même impliquée dans des processus fondamentaux tels que l'adaptation environnementale ou la survenue de certaines maladies. Nous cherchions hier le contrôle génétique des caractères, nous percevons aujourd'hui à quel point ce contrôle est intrinsèquement variable. De nouvelles techniques d'observation et d'analyse nous permettent d'extraire les facteurs génétiques ou environnementaux agissant sur cette variabilité.

C. Contrôles post-transcriptionnels de l'ARN

L'expression des gènes dépend de leur transcription, mais aussi de tous les processus co-ou post-transcriptionnels : choix du site de polyadénylation, épissage alternatif, stabilité des ARNm, taux de traduction. La large diffusion des techniques de séquençage haut débit a fait exploser ce champ de recherche.

Les gènes génèrent souvent une multitude de transcrits. Même lorsque ceux-ci codent la même protéine, ils peuvent différer par la présence d'éléments régulateurs : petites ORF en amont (uORF) ou IRES qui régulent l'initiation de la traduction, sites de liaison à des facteurs liant l'ARN (protéines ou miRNAs) qui contrôlent leur stabilité, leur localisation ou leur traduction en fonction des besoins cellulaires. Le défi est maintenant d'obtenir non seulement un descriptif de ces isoformes alternatives à l'échelle du transcriptome entier, mais surtout une vision intelligible de leurs fonctions respectives, afin d'accéder à l'ensemble des potentialités des génomes. Ceci permettra d'appréhender les programmes d'expression géniques et leur dérégulation dans toute leur complexité.

Dans de nombreux modèles d'étude, les variations de la quantité des ARNm ne sont

pas corrélées à celles des protéines correspondantes, preuve de l'importance des régulations traductionnelles. L'analyse du translatome par les techniques de « polysome profiling » ou de « ribosome profiling » apparaît donc indispensable, et on peut regretter que ces approches -omics se soient moins répandues dans les laboratoires français que dans des pays comme les USA ou l'Angleterre. Elles ont aussi changé notre vision de la traduction, en révélant la présence d'une abondante traduction en dehors de la phase codante annotée. Ainsi la présence de ribosomes actifs dans les 5' et 3'UTR, mais aussi sur des ARN dits « non codants », laisse entrevoir un protéome beaucoup plus riche qu'attendu en petits peptides, dont les rôles demeurent largement inconnus et pour lesquels les techniques de biologie moléculaire actuelles sont peu adaptées. Enfin, les techniques récentes d'imagerie en temps réel de la traduction *in vivo* (SUNTAG, MOONTAG) permettent désormais d'aborder la dynamique spatio-temporelle de la traduction, avec une résolution inégalée.

Un autre champ émergent est celui concernant les modifications des ARNm, dont l'importance a récemment été mise en évidence grâce à de nouvelles méthodes d'analyse. Elles apparaissent dynamiques et peuvent affecter la stabilité, la localisation, et la traductibilité des ARNm. Bien que la méthylation des adénines soit la plus étudiée, il existe au moins une dizaine d'autres modifications dont les fonctions restent à caractériser. De plus, les ribosomes ne sont pas une population homogène : en fonction des modifications de l'ARNr et de leur composition en protéines ils peuvent traduire préférentiellement certains ARNm. Il est probable que ce concept de ribosome spécialisé, qui ajoute une nouvelle possibilité de contrôle de l'expression des gènes, va se développer dans un proche avenir.

D. Héritabilité et maintenance de l'épigénome

La chromatine est formée par l'association d'ADN, d'ARN et de protéines histone et non-

histone. L'épigénome est défini comme l'ensemble des modifications qui affectent la chromatine, et inclut notamment la méthylation de l'ADN, les modifications post-traductionnelles des histones, les ARN non codants. Il dicte l'identité cellulaire, en imposant un patron spécifique d'expression des gènes, et intervient dans tous les processus liés à l'ADN (3R : réplication, recombinaison, réparation). Par ailleurs, l'organisation en 3D impose des contraintes architecturales à la chromatine, qui s'organise en domaines fonctionnels, territoires chromosomiques et chromatiniens, dont les mécanismes de mise en place et de maintien restent pour la plupart à élucider.

Le défi de ces prochaines années est de comprendre comment la signature épigénétique d'une cellule, et l'organisation spatiale de la chromatine sont transmises au cours des générations successives afin que la cellule conserve son identité. Plusieurs questions se posent. Comment la cellule restaure la structure chromatinienne après la réplication ? Comment préserve-t-elle la mémoire transcriptionnelle lors de la mitose ? Comment les gamètes réorganisent leur génome pour former un zygote totipotent qui est à l'origine d'une nouvelle vie ? Tout dérèglement dans ces processus est à l'origine d'instabilité génétique pouvant conduire au cancer ou à l'infertilité.

Un autre volet important est de déterminer comment les processus épigénétiques concourent à l'homéostasie cellulaire, et quels sont les liens entre le métabolisme et les enzymes de modification de la chromatine. Cet axe de recherche ouvre des voies pour le traitement des maladies métaboliques comme le diabète.

Enfin, les dommages à l'ADN à l'origine de l'instabilité génétique associée aux cancers, sont réparés au sein de la chromatine. Il est crucial de comprendre comment le contexte chromatinienn intervient dans le choix des voies de réparation, et comment la structure chromatinienn est rétablie après la réparation.

Les approches en cellule unique, de nouvelles méthodes biophysiques pour étudier la séparation de phases liquides et la possibilité d'éditer le génome (CRISPR-Cas9) seront des

technologies essentielles pour répondre à ces questions.

E. Contribution des éléments transposables à l'organisation et l'expression des génomes

Les éléments transposables (ET) sont des composants majeurs des génomes eucaryotes et procaryotes. Suite au séquençage massif de nombreux génomes et aux études fonctionnelles à grande échelle, leur impact sur la régulation de l'expression génique, sur l'apparition d'une pathologie ou sur l'évolution des espèces est devenu un champ ouvert d'interrogations et d'investigations.

Les ET ont une action ambivalente pour les organismes. On leur attribue une action positive sur les génomes en raison de la variabilité génétique que leurs nouvelles insertions peuvent créer (source potentielle d'adaptation à des changements environnementaux) et une action négative à travers les mutations délétères qu'ils peuvent provoquer. Le poids de ces actions sur la biologie d'un organisme est cependant loin d'être élucidé. Les études menées ces dix dernières années ont montré qu'un équilibre existe entre répression et expression des ET, équilibre qui peut varier en fonction de l'âge ou de stress environnementaux.

Au cours de stades spécifiques du développement de la lignée germinale, la répression des ET est relâchée, leur permettant d'amorcer des cycles de réplication engendrant de nouvelles insertions. Quelles en sont les conséquences sur les générations futures ? La question du rôle joué par les ET et des conséquences à long terme sur les descendants est notamment posée dans le cadre d'exposition à des stress tels que changements climatiques, agents chimiques, radiations.

La répression/expression des ET dans la lignée somatique a jusque-là été moins étudiée mais des analyses menées sur des cellules uniques ainsi que le suivi d'une copie unique d'un

ET au sein du génome ouvrent le champ à des études qui permettront de comprendre l'impact des ET dans des pathologies où une expression forte a parfois été mise en évidence. Elles permettront enfin de savoir s'ils jouent un rôle actif dans l'établissement de la pathologie ou s'ils sont des éléments passifs.

La diversité des ET et le succès de leur invasion génomique ont modelé les génomes. Examiner les propriétés intrinsèques d'un ET en lien avec celle du génome hôte, estimer l'impact de transferts horizontaux qui se révèlent beaucoup plus fréquents qu'initialement postulé, permettra d'avancer dans la compréhension de leur rôle en tant que moteur de l'évolution des génomes. Ce rôle évolutif devra être envisagé en considérant l'ET comme un acteur du génome capable d'apporter de nouvelles fonctions soit grâce aux protéines/ARN qu'il code, soit grâce aux réarrangements résultant de son insertion génomique (addition d'exons, nouveau gène), et aux séquences régulatrices qu'il apporte (enhancers, sites de polyadénylation...). Ces fonctions ont largement contribué à structurer le génome humain et de multiples cas de domestication ou de cooptation d'ET ont été décrits sans qu'on puisse estimer leur poids réel au cours de l'évolution. Leur impact sur la fraction non codante du génome (ADN et ARN) et sur les fonctions biologiques associée est peu étudié et devrait changer notre vision du rôle des ET dans les génomes.

Les nouveaux outils génétiques tels que le séquençage de longs fragments d'ADN, l'analyse de cellules uniques, le suivi d'une copie unique d'ET, la mutagenèse par le système CRISPR-Cas sont autant d'outils qui permettront de lever le voile sur l'importance biologique de ces éléments.

F. Organisation des génomes en 3D

Les chromosomes procaryotes, d'archaea et eucaryotes ne sont pas organisés aléatoirement

mais présentent des structures hiérarchisées et complexes. Cette architecture tridimensionnelle et son interaction fonctionnelle avec l'expression des gènes ou d'autres processus métaboliques du chromosome tels que la réparation, la duplication ou la ségrégation sont activement étudiées dans plusieurs espèces (notamment l'humain, la souris, la drosophile). Plusieurs décennies d'amélioration des techniques d'imagerie sur cellules vivantes, ainsi que le développement récent d'approches génomiques telles que la capture de conformation chromosomique (HiC) ont révélé des mosaïques de structures entrelacées formant des boucles, domaines, ou compartiments. Les données générées par ces méthodes invitent un nombre croissant de physiciens à se pencher sur ces questions. Leurs contributions, tirant parti de modèles issus de recherche en physique des polymères ou de séparation de phase liquide-liquide, ont contribué au développement de nouvelles hypothèses et expériences, et amélioré notre compréhension des principes physiques qui sous-tendent le repliement des chromosomes. Ce domaine interdisciplinaire couvre par ailleurs un large éventail de sujets de recherche en biologie, puisque les liens entre structure 3D des génomes et différenciation cellulaire, régulation de l'expression génique, évolution, ou encore maladies géniques, cancer, et infection, sont au cœur des questions étudiées. Après une période relativement descriptive, générant une abondante littérature axée principalement sur les modèles mammifère et mouche, les analyses deviennent de plus en plus fonctionnelles au fur et à mesure que des composants moléculaires impliqués dans la structuration des génomes sont découverts et étudiés.

Tous les génomes étudiés à ce jour présentent deux types principaux d'organisation à grande échelle : une compartimentation de grands domaines d'ADN dans la cellule bactérienne ou dans le noyau eucaryote, et le repliement local d'ADN en grandes boucles. La perturbation du repliement, par des mutations des complexes régulateurs ou par modifications structurelles de la molécule d'ADN elle-même peut provoquer des interactions anormales entre séquences régulatrices transcrip-

tionnelles, entraînant parfois une dérégulation génétique. Un exemple frappant est l'implication d'une modification du repliement 3D de groupes de gènes Hox dans le développement des membres chez la souris, suite à une modification structurelle du chromosome.

D'autres avancées en imagerie haute résolution et techniques génomiques impliquant du séquençage de troisième génération (PacBio, Nanopore, etc.) vont bientôt permettre de disséquer la variabilité de cellule à cellule du repliement chromosomique et fournir des informations supplémentaires sur sa pertinence fonctionnelle. Associé à de la transcriptomique en cellule unique, cela permettra de caractériser en profondeur l'interaction entre repliement du chromosome et métabolisme cellulaire.

À mesure que le domaine de recherche et les techniques évoluent, il devient possible de décrire l'évolution du repliement des chromosomes dans de nombreux groupes d'espèces. La récente commercialisation de kits de Hi-C, extrêmement efficaces pour les cultures cellulaires et relativement efficaces pour diverses espèces, permet de prédire une explosion de la quantité de données décrivant les structures 3D des chromosomes de milliers d'espèces au cours des prochaines années. Des algorithmes d'apprentissage automatique pourront aider à interpréter les données, qui sont souvent bruitées et sujettes à des biais expérimentaux.

Ces kits vont également permettre d'augmenter significativement le nombre de génomes complètement assemblés. En effet, caractériser les fréquences de contacts entre segments d'ADN d'un chromosome permet d'inférer la distance physique qui les sépare. L'application de ces techniques aux échantillons de métagénomique a également fait ses preuves. Elles permettent non seulement de caractériser les génomes d'espèces présentes dans des écosystèmes complexes, mais aussi d'étudier le flux de molécules d'ADN au sein d'une population. De telles approches sont actuellement mises en œuvre dans des projets exploratoires à grande échelle visant à caractériser les génomes de tous les animaux vivants, ou les métagénomes des océans.

III. Génomique comparative et évolution des génomes

A. Séquencer le vivant

Après le séquençage des génomes d'espèces modèles, de nombreuses espèces d'intérêt économique et de milliers de versions du génome humain, une nouvelle ère débute aujourd'hui avec le séquençage systématique de la biodiversité. De grands consortiums ont vu le jour afin d'associer les curateurs de grandes collections (Muséums, etc.), des spécialistes en génomique et des bioinformaticiens. Les objectifs sont extrêmement ambitieux. En termes de qualité, les génomes seront complets, chaque chromosome sera continu, et le taux d'erreur très faible. En termes de couverture de la biodiversité, certains projets envisagent d'être exhaustifs. Par exemple, le consortium Genome 10K (G10K), qui vise à séquencer environ 10 000 génomes de vertébrés, a ensuite donné naissance au «Vertebrate Genome Project» (VGP) qui ambitionne de séquencer un représentant de toutes les espèces de vertébrés (66 000 espèces) en débutant par un représentant de chaque ordre (environ 280 espèces). Au Royaume-Uni, le «Darwin Tree of Life Project» prévoit également de séquencer 66 000 génomes, mais de toutes les espèces eucaryotes (plantes, animaux, champignons, protozoaires) vivant sur les îles britanniques. Un projet similaire est en cours d'élaboration en Catalogne. On peut encore citer le projet I5K visant à séquencer les génomes de 5 000 espèces d'insectes, dont 10 % sont déjà terminés. Ces projets s'inscrivent dans un effort international appelé «The Earth BioGenome Project», auquel participent activement des chercheurs aux USA, en Chine, en Allemagne, au Danemark, au Royaume-Uni, en Australie, au Brésil et en Espagne. La France est la grande absente de ces projets de séquençage ciblé et de haute qualité de génomes représentant une espèce ou un groupe

d'espèces. Cependant elle contribue activement au séquençage de la biodiversité grâce au projet TARA Océan (*voir section suivante*), qui échantillonne depuis 10 ans les micro-organismes eucaryotes (plancton) à différentes profondeurs et sur toutes les mers du globe, et bientôt des rivières, en vue de leur séquençage par une stratégie « métagénomique ».

Pour l'instant les séquences produites par les grands projets cités ci-dessus sont déposées dans des bases de données publiques, selon une tradition établie dans la communauté génomique dès la fin des années 90. Néanmoins les consortiums préemptent un droit à un « premier regard » sur les données, afin de conserver la primeur des résultats les plus importants. En ne s'impliquant pas, la communauté française risque de passer à côté d'un savoir-faire essentiel pour la recherche en biologie et biotechnologie des années à venir.

B. Aux origines du vivant : archées, eucaryotes, bactéries, virus

L'accès massif aux séquences de nouveaux génomes d'organismes unicellulaires, dans les trois domaines du vivant, grâce notamment aux nouvelles expéditions TARA, va offrir un échantillonnage taxonomique sans précédent. L'analyse comparative de ces nouveaux génomes et la reconstruction de leur histoire évolutive permettra de résoudre des questions fondamentales ayant trait aux origines de la vie.

– Comment se sont créés les gènes lors de l'apparition des organismes cellulaires? Les virus géants, qui abritent dans leurs génomes une immense majorité de gènes inconnus, ont-ils été des pourvoyeurs de gènes pour les organismes cellulaires? L'étude des propriétés des gènes nouvellement créés dans les génomes actuels devra être poursuivie, afin de tenter de caractériser leurs fonctions. Pour cela, l'intégration de données multi-échelles, combi-

nant des données génomiques, protéomiques et interactomiques permettra de définir les réseaux génétiques auxquels appartiennent ces gènes. Des études d'évolution expérimentale pourront également explorer les conditions dans lesquels ces nouveaux gènes se structurent.

– Comment s'est effectué le passage d'une biologie anaérobie sur le globe à une biologie oxygénique? Il s'agit de comprendre les conditions de l'émergence et l'origine des cyanobactéries, premiers organismes photosynthétiques à utiliser l'eau comme source d'électrons en libérant de l'oxygène dans l'atmosphère, condition nécessaire à l'émergence de la cellule eucaryote.

– Quels sont les facteurs clés à l'origine de l'eucaryogénèse? Le séquençage de nouvelles Archaea et de nouvelles bactéries permettra de préciser la branche d'Archaea qui se rapproche le plus de l'ancêtre de la cellule eucaryote et la branche bactérienne qui se rapproche le plus de l'ancêtre de la mitochondrie. Ces données génomiques permettront également de confronter des scénarios alternatifs, l'un proposant que l'endosymbiose mitochondriale a eu lieu dans une cellule proto-eucaryote déjà pourvue d'un réticulum endoplasmique tandis que l'autre considère une endosymbiose mitochondriale précoce à partir d'une bactérie pathogène en intégration métabolique dans une Archaea avant la structuration d'un noyau et du réticulum endoplasmique. Il s'agira donc de déterminer avec plus de précision phylogénétique les dates d'apparition respectives du réticulum et de l'endosymbiose primaire.

IV. Microbiologie

Les enjeux des recherches en Microbiologie fondamentale sont à la fois *cognitifs*, pour la compréhension du fonctionnement de la cellule vivante, le développement et la validation de méthodes qui sont ensuite appliquées à des systèmes plus complexes, et *applicatifs* afin

d'améliorer des processus biotechnologiques ou de combattre les maladies infectieuses.

Sur un axe biotechnologique, la microbiologie apporte des stratégies pour la production de bioénergie, pour la dépollution ou pour la production de molécules d'intérêt. Concernant la santé humaine, des études centrées sur les bactéries sont essentielles afin de comprendre les processus impliqués dans les maladies infectieuses et lutter contre l'apparition de résistances aux antibiotiques.

Les études sur le microbiome humain, qui s'apparente à un véritable organe, ainsi que sur les biofilms multicellulaires procurant des propriétés nouvelles de colonisation et de résistance, ont révélé leur rôle essentiel dans la santé humaine. Dans ce domaine, une microbiologie expérimentale et déductive est nécessaire si l'on veut réellement comprendre le fonctionnement de communautés complexes. Les recherches doivent ainsi dépasser une science purement descriptive et -omique tout en évoluant de l'étude d'organismes individuels à l'étude de populations mixtes. En cela, les techniques de microfluidique vont prendre une place de plus en plus importante, faisant suite à l'explosion de la biologie cellulaire et de l'imagerie chez les procaryotes. Ces outils ont déjà largement influencé les travaux menés sur les microorganismes au cours des dernières années. Au-delà de la métagénomique, qui donne accès à la biodiversité des populations dans un écosystème donné, les approches de microfluidique permettent d'étudier l'hétérogénéité phénotypique qui peut exister au sein d'une population clonale et de comprendre comment l'introduction d'une variable externe (température, nutriment, drogue, nouvelle espèce...) peut perturber un équilibre populationnel. Ainsi, ces approches ouvrent de nouvelles perspectives pour comprendre les mécanismes de communication bactérienne et les processus adaptatifs comme l'évolution de la résistance aux antibiotiques et l'émergence de cellules persistantes.

Avec le développement de nouvelles techniques, la génétique microbienne retrouve toute sa puissance. Les cribles génétiques classiques sont maintenant suivis par du séquen-

çage à haut débit, des banques d'ARN pour l'interférence CRISPR, et l'utilisation d'autres bactéries « barcodées ». Ces études restent nécessaires pour élucider la fonction de la majorité du réservoir de gènes procaryotes. De plus, ces approches à l'échelle génomique couplées à la robotisation permettent maintenant de développer des études d'envergure pour comprendre la réponse des bactéries à des changements de l'environnement, les gènes impliqués, ou les effets conjugués de différentes drogues (antibiotiques et antidépresseurs par exemple).

La diversité métabolique et leur capacité d'adaptation font des bactéries les systèmes les plus performants pour le développement d'une approche systémique et la modélisation des processus biologiques. La connaissance du métabolisme permet de redessiner les processus biologiques et d'en créer de nouveaux en combinant les analyses intégratives au génie génétique et à des expériences d'évolution contrôlée pour la sélection de nouveaux processus biologiques. Cette biologie synthétique permet de comprendre le fonctionnement d'une bactérie et est porteuse d'applications considérables dans la chimie de synthèse.

L'étude du monde bactérien présente donc des facettes multiples, cognitives et appliquées, et les équipes françaises ont su depuis de nombreuses années maintenir un niveau d'excellence en microbiologie moléculaire, qu'elle soit fondamentale, environnementale, biotechnologique ou infectieuse.

V. Évolution des thématiques et recrutements

Au cours des 20 dernières années, la recherche en biologie en général, et sur la biologie des génomes en particulier, a vu deux évolutions majeures dont il conviendrait de mesurer les conséquences sur le recrutement et l'évaluation des chercheurs. La première concerne

les outils informatiques, dont l'utilisation est passée d'un domaine réservé aux chercheurs spécialisés, souvent en génomique, à une *démocratisation* vers l'ensemble des disciplines et des questions relatives à la biologie moléculaire. Aujourd'hui, de nombreux jeunes chercheurs et jeunes chercheuses proposent des projets aux concours de recrutement du CNRS, aux ATIPs, à l'ANR JCJC ou aux ERC « starting grant » qui s'appuient sur un axe « biologie computationnelle ». Dans ces projets, la question posée est clairement d'ordre biologique, mais la stratégie mise en oeuvre pour y répondre fait appel à des outils informatiques et statistiques maîtrisés par ces chercheurs et parfois très sophistiqués. La deuxième évolution majeure concerne les méthodes expérimentales à haut débit. Longtemps réservées à l'ADN et l'ARN car s'appuyant sur des technologies de séquençage, ces approches se sont répandues dans de nombreux domaines au delà de la génomique, comme la biologie du développement, la biologie cellulaire, la recherche sur le cancer, l'évolution du vivant et la biodiversité. Ces technologies à haut débit dépassent d'ailleurs les approches liées au séquençage et incluent par exemple l'imagerie, la protéomique, les cribles cellulaires ou la microfluidique.

Ces changements reflètent une transformation de la biologie en une discipline de plus en plus quantitative. Cette évolution très positive pose cependant des difficultés pour le recrutement et l'évaluation des chercheurs. La CID51, initialement concernée par les projets à dominante bioinformatique, se concentre maintenant sur les développements méthodologiques en informatique, statistique et modélisation appliqués à la biologie. Elle n'est plus adaptée à ces chercheurs en biologie computationnelle qui se présentent aux concours de recrutement. Dans ce contexte, la section 21 doit prendre cette évolution en compte dans la composition de ses membres et renforcer cette composante pour continuer d'évaluer à la fois la pertinence de la question et le choix des outils. A contrario, l'utilisation d'approches à haut débit dans de nombreux champs disciplinaires amène de plus en plus de chercheurs

à présenter aux concours en section 21 des projets dont les outils sont effectivement inclus dans les mots-clés de la section (génomique, transcriptomique, protéomique, biologie des systèmes) mais dont l'application concerne une question qui est clairement dans le périmètre d'une autre section (ex : immunologie, cancérologie, écologie, génétique des populations). Il conviendrait donc de prendre en compte cette généralisation des approches à haut débit dans la constitution de toutes les sections de biologie du CoNRS.

Conclusion

Ces dernières années ont vu l'analyse des génomes (organisation, expression, intégrité, évolution...) changer dramatiquement d'échelle, grâce à des innovations technologiques majeures. En particulier, le temps est venu des analyses à haut débit en molécules uniques, en cellules uniques, sur des dynamiques temporelles, en intégrant des données multi-omiques complexes grâce à des méthodes bioinformatiques et statistiques innovantes. Aujourd'hui, l'étude du « vivant » ne se circonscrit plus à quelques espèces modèles contemporaines, mais embrasse toute la biodiversité, son présent et son passé. La France maintient son rang dans de nombreux domaines mais le présent rapport identifie des points de vigilance où certains pays prennent un leadership incontesté. La multidisciplinarité est plus que jamais un atout incontestable pour faire progresser nos connaissances, en particulier dans les domaines relevant de la section 21, qui se trouve à la croisée de toutes les disciplines connexes en biologie, que ce soit l'informatique, la physique, la chimie ou les mathématiques. Il est essentiel que le CNRS, à travers son soutien de base, ses infrastructures et sa capacité à dynamiser la recherche, poursuive ses efforts pour permettre à ses équipes de recherche de maintenir un haut niveau de compétitivité.

ANNEXE 1

Abréviations

APEX : Ascorbate Peroxydase Proximity Biotinylation	GPU : Graphics Processing Unit
ATAC-seq : Assay for Transposase-Accessible Chromatin using sequencing	HiC : High throughput Conformation Capture sequencing.
CITE-seq : Cellular Indexing of Transcriptomes and Epitopes by sequencing	IRES : Internal Ribosome Entry Site
ChIP-seq : Chromatin Immuno-Precipitation and sequencing	JCJC : Jeune Chercheur Jeune Chercheuse
CID51 : Commission Inter Disciplinaire 51	ORF : Open Reading Frame
CNV : Copy Number Variation	PBAT : Post Bisulfite Adapter Tagging
CRISPR : Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats	scCOOL-seq : single-cell Chromatin Overall Omic-scale Landscape sequencing
CUT & RUN : Cleavage Under Targets and Release Using Nuclease	scMT-seq : single cell Methylome and Transcriptome sequencing
ET : Élément Transposable	scRRBS : single-cell reduced-representation bisulfite sequencing
ERC : European Research Council	SMART-seq : Switch Mechanism at the 5' End of RNA Templates and sequencing
	TAPS : TET-assisted pyridine borane sequencing

SECTION 22

BIOLOGIE CELLULAIRE, DÉVELOPPEMENT, ÉVOLUTION – DÉVELOPPEMENT

Composition de la section

Laurent KODJABACHIAN (président de section), Muriel PERRON (secrétaire scientifique), Corinne ALBIGES-RIZO, Philippe CHAVRIER, Didier CASANE, Membres : Fabien ALPY, Agnès AUDIBERT, Alexandre BENMERAH, Patrick BLADER, Sophie CHAUVET, Solange DESAGHER, Aude-Isabelle DUPRE, Anne FERNANDEZ, Norbert GHYSELINCK, Jacky GOETZ, Benoit LADOUX, Catherine LECLERC, Marianne MALARTRE.

Résumé

Les révolutions technologiques récentes en omique (séquençage à haut débit, édition du génome, protéomique) et en imagerie cellulaire (super-résolution, live imaging, cryo-EM) ont transformé les champs d'investigation de la biologie cellulaire et de la biologie du développement. Aujourd'hui, les mécanismes du vivant et leur évolution sont mis à jour dans toutes leurs dimensions avec davantage de profondeur et de précision. En même temps qu'elle devient quantitative, la biologie devient prédictive, via le rapprochement avec la physique et les mathématiques. Les modèles d'étude également s'enrichissent, notamment via l'avènement des cellules souches embryonnaires et induites et les progrès importants de

l'ingénierie cellulaire et tissulaire qui permettent de créer des mini-organes toujours plus complexes. La relative démocratisation des approches à haut débit permet aujourd'hui d'explorer les branches méconnues du monde animal, à la recherche de nouveaux mécanismes soutenant la longévité ou les capacités de régénération. Ainsi, les promesses d'une médecine régénérative efficace, nourrie par les enseignements de la biologie cellulaire et développementale, ne cessent de se renforcer. Pourtant, il convient de rappeler au grand public et aux décideurs que pour atteindre ces objectifs il faut continuer à soutenir la recherche fondamentale nourrie par la seule curiosité des chercheurs et à autoriser des expérimentations raisonnées sur les animaux.

Introduction

Le champ thématique de la section 22 est clairement défini par son intitulé : il est principalement centré sur le fonctionnement des cellules, étudiées individuellement et collectivement lors du développement. C'est donc très naturellement que s'inscrivent dans cette section les études portant sur l'évolution des mécanismes moléculaires impliqués dans la diversité des cellules et des organismes multicellulaires. Toutefois, il apparaît clairement que la recherche dans ces thématiques se déploie aujourd'hui à une échelle intégrative plus large qui implique des interactions fortes avec d'autres champs disciplinaires plus ou moins proches, que ce soit pour les objets étudiés ou les outils conceptuels et expérimentaux employés. Il faut donc davantage tenir compte des progrès des connaissances à des niveaux d'organisation inférieurs, grâce aux apports de la physique et de la chimie, mais aussi à des niveaux d'organisation supérieurs, avec par exemple la prise en compte des interactions des cellules entre elles au sein d'un organisme et de l'organisme avec son environnement biotique et abiotique. Par ailleurs, maintenir et renforcer une recherche fondamentale de premier plan en biologie cellulaire et en développement sera nécessaire à des recherches appliquées, en particulier dans le domaine de la santé.

Les rédacteurs de ce rapport ont fait des choix qu'il convient d'expliquer brièvement. En premier lieu, nous n'avons pas souhaité fournir un rapport exhaustif couvrant l'ensemble des sous-disciplines de notre section qui sont très nombreuses (la section 22 est la plus grande du CNRS en nombre de chercheurs affiliés). À la place, nous avons préféré prendre du recul pour fournir un document plus conceptuel et transversal. Ainsi, certains phénomènes de la biologie cellulaire et du développement ne sont pas cités, sans volonté de les ignorer ou de diminuer leur importance. En second lieu, nous n'avons pas souhaité faire de mention explicite à des

laboratoires ou des chercheurs de la section, estimant que ces informations sont disponibles dans les rapports d'évaluation que nous fournissons régulièrement. Nous avons délibérément limité notre propos aux animaux, considérant que la biologie cellulaire et du développement des plantes est l'apanage de la section 23. Enfin, nous n'avons pas traité la question de la valorisation industrielle des travaux en biologie cellulaire et biologie du développement, dans la mesure où elle reste modeste par rapport à d'autres sections de biologie et surtout à d'autres établissements publics de recherche.

I. Mécanismes

L'échelle cellulaire est particulière en biologie. En effet, c'est la plus petite échelle à laquelle un système biologique est autonome. Chez les métazoaires, les cellules sont les briques élémentaires des tissus et des organes. Les processus moléculaires et cellulaires tels que la signalisation, l'adhésion, la prolifération, la mort, la migration, le trafic membranaire ou la dynamique du cytosquelette ne peuvent pas être étudiés séparément mais doivent être considérés comme des événements intégrés à l'échelle de la cellule. Les signaux biochimiques et biophysiques provenant de l'environnement extracellulaire (les cellules avoisinantes, la matrice extracellulaire...) ainsi que les signaux provenant de la cellule elle-même influencent l'état génomique, transcriptomique et protéomique de la cellule et déterminent son devenir et ses fonctions. Par conséquent, il est essentiel de comprendre comment la coordination des mécanismes cellulaires élémentaires et leur régulation par les signaux cellulaires et environnementaux contribuent à l'homéostasie et aux fonctions cellulaires fondamentales. Réciproquement, les propriétés biomécaniques et biophysiques des cellules influencent l'organisation et le fonctionnement des tissus dont elles sont les

éléments constitutifs et modifient leur environnement. La dérégulation de ces propriétés biophysiques et mécaniques peut ainsi contribuer à l'initiation et à la progression de maladies. Enfin, du fait des mécanismes de l'évolution, ces processus fondamentaux ne sont que partiellement conservés entre les espèces, ce qui nécessite et justifie leur étude et leur comparaison dans différents organismes et systèmes modèles qui sont largement utilisés dans les laboratoires de la section 22.

Un large éventail de molécules de signalisation et de récepteurs spécifiques existe dans les différents types cellulaires composant un organisme pluricellulaire, mais les réponses appropriées aux signaux externes et internes ne nécessitent souvent qu'un nombre limité de voies de signalisation élémentaires. Une question évidente est donc de savoir comment la complexité de la réponse d'une cellule donnée est coordonnée par un nombre aussi limité de voies de signalisation primaires. La réponse réside sans aucun doute dans les multiples façons dont ces voies interagissent, se régulent, s'isolent et collaborent. Il s'agit donc actuellement de comprendre comment des combinaisons de signaux moléculaires et physiques ainsi que leurs variations spatio-temporelles sont capables d'augmenter le potentiel de certaines molécules, de générer une signalisation dynamique et une diversité de réponses cellulaires, depuis le mécanisme fondamental de la fusion des gamètes au cours de la fécondation jusqu'à la mort d'une cellule dans un tissu adulte, en passant par toutes les étapes développementales qui séparent ces deux événements. L'avènement de techniques holistiques génère une quantité importante de données (transcriptome, protéome, métabolome, sécrétome, phosphorylome...) qui, associées à l'exploration des réseaux d'interaction, permet désormais une analyse globale des voies de signalisation, tandis que les développements récents en imagerie et en biologie synthétique ouvrent des horizons nouveaux pour en visualiser les composants et étudier leurs fonctions.

A. Couplage de fonctions

Les voies de signalisation interagissent à différentes échelles pour définir l'identité (cellule souche, progénitrice, différenciée), le destin (prolifération, sénescence, apoptose, fusion...), le fonctionnement (métabolisme, sécrétome...) et la morphologie des cellules (cytosquelette, noyau, organites...). Un des enjeux majeurs pour les années à venir est donc de comprendre les mécanismes par lesquels ces voies de signalisation se complètent et comment l'activité d'un système peut être contextualisée par l'activité des autres. La découverte récente du dialogue entre les voies de signalisation Wnt, Hippo, les intégrines ou les récepteurs des facteurs de croissance pour assurer une adaptation optimale de la cellule à son environnement et pour coupler des fonctions considérées jusqu'alors comme étant dissociées (migration et différenciation par exemple) offre un exemple saisissant mais aussi une source d'inspiration pour la médecine régénérative.

B. Compartimentation spatiale

Un autre problème fondamental en biologie cellulaire concerne l'organisation spatiale de la cellule qui permet de contrôler des réactions biochimiques complexes dans l'espace au cours du temps. L'agencement des composants influence les réactions : leur rapprochement peut déclencher ou accélérer des cinétiques. À l'inverse, leur ségrégation peut les ralentir voire les inhiber. Une telle organisation favorise des réactions enzymatiques permettant, par exemple, de protéger les cellules d'activités délétères telles que la protéolyse, l'exposition aux radicaux libres, des modifications covalentes inappropriées ou encore des modifications du pH intracellulaire. Ainsi, un domaine émergent concerne l'étude des condensats moléculaires (nucléole, P-bodies, granules de stress...). Dépourvus de membrane limitante, ces

condensats, qui résultent de la séparation de phase, fonctionnent comme des centres de signalisation associant protéines et/ou acides nucléiques. Ils permettent la séquestration temporaire de biomolécules (facteurs de transcription, ARN...) et contribuent ainsi à la spécificité et l'efficacité de processus complexes comme la transcription, le métabolisme des ARN, la biogénèse des ribosomes, la réparation des dommages à l'ADN, le contrôle du cycle cellulaire ou encore la transduction du signal.

C. Communication cellulaire et micro-domaines de signalisation

La communication inter-cellulaire relayée par les voies de signalisation est fondamentale pour que la morphogénèse de l'embryon soit invariable ou pour le moins robuste, afin de permettre à des tissus et organes de taille adéquate de se développer au bon endroit et au bon moment. En ce sens, comprendre comment les gradients de morphogènes ou de ligands sont mis en place grâce à leur diffusion à partir d'une source localisée, activent des voies de signalisation et déterminent des informations de position essentielles à la morphogénèse est un axe de recherche important. La signalisation nécessaire à la cohésion des tissus et la morphogénèse peut aussi prendre la forme de micro-domaines cloisonnés qui facilitent la communication de la cellule avec son microenvironnement ou avec les cellules avoisinantes par ancrage (structures adhésives), par des mécanismes sensoriels (cils) ou par la production et la réception de signaux sous formes de vésicules extracellulaires, tels que les exosomes. À l'échelle cellulaire, bien que considéré comme un mécanisme clé dans la spécificité et l'efficacité des voies de signalisation, le rôle du cloisonnement, et en particulier des micro-domaines membranaires, reste pourtant mal défini. Comprendre comment l'assemblage, la composition, les propriétés physiques et les fonctions biochimiques et cel-

lulaires de ces micro-domaines sont régulés sera essentiel pour appréhender le rôle des voies de signalisation dans la communication cellulaire.

D. Signalisation temporelle et dynamique des réseaux

Le contrôle temporel est crucial pour de nombreux processus développementaux comme l'acquisition de l'identité, la migration et la dynamique du cycle cellulaire dont l'orchestration fait intervenir des modulations temporelles et quantitatives des voies de signalisation. Pour répondre aux stimuli extracellulaires, les réseaux utilisés par les cellules présentent des architectures complexes, ramifiées et douées de rétroactions. Démêler comment l'information circule dans ces réseaux pour coder des réponses précises permettra d'activer sélectivement des nœuds identifiés et d'observer comment les perturbations se propagent dans le système. La perturbation optogénétique est une approche puissante pour interroger entre autres les circuits neuronaux complexes ou les transitions phénotypiques. Cet outil offre à présent la possibilité de contrôler l'activité de voies de signalisation élémentaires en temps réel dans les cellules vivantes, et de suivre la circulation de l'information au travers des réseaux afin de comprendre comment un signal donné génère des comportements cellulaires aussi divers que la prolifération, la mort cellulaire, la différenciation ou la quiescence. De telles approches donnent accès aux types d'informations que la cellule peut analyser et à la prise de décision qui en découle. L'information peut être codée de façon combinatoire (résultant de stimuli externes différents), mais aussi de manière dynamique, en fonction de la durée ou de la fréquence d'activation, qui sont des déterminants clés de la spécificité des réponses et de la prise de décision sur le devenir des cellules.

E. Communication entre compartiments et mécanique cellulaire

La proximité étroite entre les organites, bien que décrite depuis longtemps, est restée négligée en raison de la nature transitoire, de la densité variable et des conséquences multiples de ces contacts dans les différents types cellulaires. La découverte récente que la communication entre organites est essentielle à l'homéostasie cellulaire a attiré l'attention de scientifiques de multiples domaines. Cette communication s'établit par l'intermédiaire de contacts membranaires, comme par exemple entre le réticulum endoplasmique, les mitochondries ou l'appareil de Golgi. Cette communication assure la biosynthèse et le transfert de lipides, le transfert d'ions (calcium) et est également essentielle au cours de l'autophagie. Ces contacts restent encore aujourd'hui difficiles à visualiser en raison de leur dimension et de leur état transitoire, mais il est essentiel de comprendre leurs fonctions et d'étudier comment les perturbations environnementales et génétiques les affectent.

Un continuum mécanique existe également depuis la membrane jusqu'au noyau cellulaire par les différents composants du cytosquelette qui permettent à la cellule d'analyser les changements de propriétés physiques de son environnement et d'engager des réponses biochimiques adaptées au niveau du cytoplasme jusque dans le noyau via des mécanismes de mécano-transduction. Ceci aboutit à la régulation de l'expression des gènes par l'assemblage et le désassemblage de l'architecture modulaire des complexes transcriptionnels, souvent associés à des remaniements et des modifications épigénétiques de la chromatine. Enfin, des travaux récents suggèrent que le noyau lui-même est mécanoréactif, réagissant aux forces du cytosquelette par une multitude de réponses comprenant les changements conformationnels et la phosphorylation des protéines de l'enveloppe nucléaire, la modulation de leur relation avec la lamina nucléaire ainsi que l'im-

portation/exportation nucléaire et la modification de l'organisation de la chromatine, ce qui entraîne des changements transcriptionnels décisifs. Ce concept novateur révèle que la chromatine elle-même est un élément rhéologique actif du noyau, qui subit des changements dynamiques lors de l'application de forces, facilitant ainsi l'adaptation de la cellule aux variations mécaniques de son environnement.

II. Modèles

Les modèles cellulaires et les modèles *in vivo* actuels sont des outils indispensables pour répondre aux différentes questions scientifiques dans les champs thématiques de la section 22. Il est cependant important d'avoir le recul nécessaire sur leurs limites, et d'encourager la mise en place de modèles plus pertinents, plus variés et couvrant mieux l'arbre évolutif des métazoaires.

A. Valeurs des modèles cellulaires et leur importance

Les lignées cellulaires 'historiques' ont permis de décrypter les mécanismes fondamentaux de processus cellulaires clés comme la polarité, le trafic vésiculaire, le cycle cellulaire, la mitose, l'apoptose ou encore la ciliogénèse. Cependant ces modèles *in vitro* sont criticables. En effet, de nombreuses études "*in cellulo*" se contentent d'utiliser une lignée cellulaire comme un tube à essai et tentent d'extrapoler leurs conclusions en utilisant une approche binaire (perte ou gain de fonction) à laquelle se réduit mal la complexité du vivant. Toutefois, et malgré ces limitations, les systèmes *in cellulo* restent essentiels pour décrypter les mécanismes du fonctionnement cellulaire. Récemment, grâce à l'avan-

cée des techniques d'édition du génome (CRISPR-Cas9 et ses variantes telles que CRISPRi) ainsi que les approches de protéomique à large échelle, dont celles basées sur la biotinylation de proximité, ont permis de mettre en place des cribles sur l'ensemble du génome et d'identifier les composants de grandes machineries cellulaires, d'organites et de sous-compartiments cellulaires (cil primaire, centrosome, granules de stress, P-Bodies). Ces lignées permettent donc toujours d'identifier et de caractériser des machineries cellulaires fondamentales complexes et de cribler des molécules afin de corriger des phénotypes cellulaires perturbés dans des conditions pathologiques comme le cancer ou certaines maladies métaboliques.

Dans cette nécessité de diversification des outils cellulaires et approches expérimentales, le développement de modèles utilisant des co-cultures de différents types cellulaires, qui restent encore peu exploités, sera précieux pour se rapprocher de l'organisation des tissus dans lesquels plusieurs types cellulaires coopèrent pour assurer leur évolution fonctionnelle *via* des interactions clés telles que l'influence des matrices extracellulaires, les échanges de microvésicules et exosomes. De telles coopérations entre types cellulaires ont été notamment identifiées lors de la régénération/réparation musculaire dont le bon déroulement nécessite l'intervention de progéniteurs musculaires, de deux vagues de macrophages et de progéniteurs fibro-adipogéniques.

Pour conforter le rôle et l'impact fonctionnel des mécanismes mis en évidence *in cellulo* dans le contexte de la biologie du développement, de la différenciation ou de l'homéostasie tissulaire, les résultats obtenus avec des lignées cellulaires modèles doivent être 'confrontés' et validés dans des modèles *ex-vivo* et *in vivo*. Cette complémentarité est particulièrement importante dans le contexte des études sur le potentiel de différenciation des cellules souches qu'elles soient embryonnaires (ESCs), reprogrammées (iPSCs) ou dérivées de tissus adultes.

B. De l'importance des modèles *in vivo* et de leur diversification

Le corpus des connaissances sur la biologie des cellules et du développement des organismes multicellulaires a essentiellement été construit en étudiant des organismes modèles, faciles à manipuler en laboratoire (nématode, drosophile, xénope, poisson-zèbre, poulet) ou phylogénétiquement proches de l'homme (souris). Cette approche était justifiée par la recherche de processus universels et par la difficulté d'appliquer certaines approches expérimentales à une grande diversité d'organismes. Ces organismes modèles permettent d'allier biologie cellulaire *in vivo* (trafic vésiculaire, divisions asymétriques, migration, polarité...) et cribles génétiques ou moléculaires.

Toutefois, il devient indispensable de tenir compte de la diversité des organismes vivants car ce qui est vrai pour un organisme ne l'est pas nécessairement pour un autre. À la grande diversité directement observable des animaux, répond une grande diversité du fonctionnement des cellules et des mécanismes du développement qui n'a encore été que très partiellement explorée. Ainsi, il apparaît que des organismes comme des éponges, des méduses, des vers plats ou ronds et divers crustacés, insectes, mais aussi de nouveaux poissons, mammifères et oiseaux jusqu'à aujourd'hui inconnus des laboratoires seront de plus en plus utilisés pour comprendre des mécanismes absents chez les organismes modèles étudiés jusqu'à présent (en particulier les capacités régénératives) ou pour mieux comprendre les variations de mécanismes partagés et les particularités observées seulement dans quelques groupes. Comprendre l'évolution des processus cellulaires et des mécanismes du développement impliquera nécessairement une approche comparative basée sur un échantillonnage dense de l'arbre du vivant.

Par ailleurs, la cellule ou le développement d'un organisme sont examinés dans les conditions bien définies du laboratoire. Cette appro-

che, bien que pertinente pour maximiser la reproductibilité et comparer les résultats obtenus par différentes équipes, néglige la plasticité du fonctionnement des cellules et des mécanismes du développement. Pourtant, la variabilité du phénotype en fonction des variations de l'environnement est une composante fondamentale de l'adaptation des organismes. Comprendre les mécanismes moléculaires qui contrôlent l'étendue de la plasticité phénotypique en fonction de l'hétérogénéité environnementale constitue un domaine émergent à l'interface de l'Evo-Dévo et de l'Écologie qui devrait connaître un essor important dans les prochaines années.

C. Limite des modèles animaux et développement de modèles alternatifs

La recherche a progressé grâce à l'utilisation et à l'étude des animaux. Toutefois, l'expérimentation animale est actuellement remise en question en France et à l'international comme en témoigne la récente fermeture des animaleries du Sanger Institute de Londres qui a décidé de les remplacer par des modèles alternatifs. L'industrie pharmaceutique suit le même chemin. Cela préfigure certainement d'un mouvement global à anticiper. En effet, les approches impliquant les modèles animaux nécessitent un encadrement réglementaire et le développement de plateformes et d'expertises importantes ayant un coût élevé au sein des instituts. De plus, dans le domaine médical, se multiplient les exemples de molécules ayant des effets bénéfiques dans des modèles mammifères, finalement non transposables à l'homme.

Le modèle mammifère le plus courant pour modéliser les pathologies humaines demeure la souris. Toutefois, son utilisation est de moins en moins simple, en raison de son coût de revient et d'une réglementation contraignante. Le poisson-zèbre représente un modèle vertébré complémentaire à la souris. Outre son coût

de revient plus faible, ce modèle jouit de multiples avantages. La manipulation génétique y est relativement aisée, ainsi que l'est l'imagerie en temps réel pour suivre les phénomènes de migration, de division, et de différenciation cellulaire au cours du développement. Le poisson-zèbre est aujourd'hui utilisé pour caractériser des mécanismes physiopathologiques de maladies génétiques comme les ciliopathies ou les maladies neurodégénératives, mais aussi les processus d'invasion et de migration tumorale, ainsi que dans le criblage de molécules pharmacologiques. Cependant, ce modèle présente également des limites de par ses spécificités (duplication du génome, composition et organisation de la matrice extracellulaire, système immunitaire...) et demeure éloigné du lignage tétrapode.

Il est donc important de considérer et de développer des modèles alternatifs. Le développement de la reprogrammation cellulaire et des cellules souches pluripotentes induites a permis d'obtenir soit des cellules différenciées proches des cellules primaires, soit des organoïdes (structures pluricellulaires tridimensionnelles ayant pour but de reproduire *in vitro* des organes en miniature). Cela permet d'étudier des processus cellulaires fondamentaux dans un cadre se rapprochant de l'*in vivo* et mimant les phases précoces du développement. L'approche organoïde a réalisé de grands progrès dans la reconstitution de tissus organisés complexes comme les différentes parties du néphron pour le rein et des photorécepteurs différenciés pour la rétine ou encore des cerveaux en miniature. Les étapes précoces du développement chez les mammifères sont compliquées à étudier compte tenu de l'inaccessibilité des embryons dans l'utérus. La mise en place de différents types de cocultures à partir de cellules souches embryonnaires et dérivées du trophoblaste, a permis de créer des mini-embryons à des stades précoces mimant le stade blastula (blastoïdes) ou gastrula (gastruloïdes). Les premières phases du développement préimplantatoire et post-implantatoire sont ainsi aujourd'hui mieux connus, y compris chez l'homme.

Le développement de lignées iPSC exprimant des marqueurs fluorescents et la possibilité d'édition du génome par la technique CRISPR-Cas9 permettent d'étudier des machineries cellulaires dynamiques au cours de la différenciation par des techniques d'imagerie en temps réel. Ces études concourent à une meilleure compréhension des mécanismes au cours de l'organogénèse chez l'homme, et la production de modèles alternatifs de maladies humaines permet d'envisager des cribles pharmacologiques plus pertinents. Parallèlement, se développent les techniques d'organes-surpuce (organ-on-a-chip). Les découvertes dans le domaine des nanotechnologies permettent d'améliorer ces micro-structures et de mimer les dynamiques propres aux conditions *in vivo*. Ce domaine en pleine expansion devrait permettre dans un avenir proche l'analyse de processus développementaux à partir de cellules saines ou dérivées de patients. Cependant, chez l'homme, l'obtention de cellules primaires, même de simples fibroblastes de peau, devient de plus en plus compliquée à cause des réglementations drastiques sur les prélèvements invasifs.

Pour conclure, malgré le développement de méthodes alternatives, il est important de ne pas perdre de vue que la compréhension des mécanismes fondamentaux qui intéressent notre section, nécessite de comparer différents modèles animaux (méduse, nématode, drosophile, oursin, ascidie, amphioxus, poisson-zèbre, xénope, poulet, souris...), notamment pour les questions concernant la fécondation, la méiose, la morphogénèse ou la régénération. En effet, il apparaît que la compréhension des mécanismes qui sous-tendent le développement ne peut se passer de l'étude de leurs variations. Ainsi, l'élucidation des règles fondamentales du vivant ne peut pas se contenter de l'étude approfondie d'une seule espèce. Il est donc primordial de préserver les savoirs et les expertises techniques acquises sur les modèles historiques et de faciliter l'introduction de nouveaux modèles tout au long de l'arbre évolutif pour poursuivre la recherche sur l'évolution des processus cellulaires et développementaux.

III. Interdisciplinarité

A. Interface avec la physique

Ces dernières années ont été marquées par le développement des approches à l'interface de la physique et de la biologie. En particulier, l'impact des contraintes mécaniques est reconnu comme un régulateur clé de nombreux processus biologiques, allant des molécules aux organismes, tout au long du développement embryonnaire, mais aussi lors de la régénération tissulaire et dans des situations de régulations physiologiques et de dérèglements pathologiques, tels que le cancer. Ces approches transdisciplinaires et multi-échelles ont été rendues possibles grâce aux avancées technologiques considérables réalisées dans les domaines de l'imagerie du vivant, avec le développement de la nano et de la microfabrication, mais également grâce à un attrait et une perméabilité croissante entre les disciplines, en particulier entre la biologie et la physique. La mécanobiologie s'est focalisée sur les liens entre propriétés mécaniques et régulation des signaux biochimiques, comme par exemple dans l'organisation du cytosquelette, des complexes adhésifs et du noyau. À plus long terme, ce champ de recherche nous renseignera sur les mécanismes de la réparation cellulaire, de la reprogrammation et de la différenciation des cellules souches. Couplé aux méthodes de l'ingénierie, on attend ainsi des progrès pour la biologie fondamentale comme pour la médecine régénérative, *via* la construction d'organes complexes voire hybrides matériaux-cellules. À l'échelle macroscopique, la mécanotransduction contribue probablement à l'influence des forces générées par le flux sanguin, à la rigidité globale des tissus et son évolution au cours du développement ou du vieillissement, à la contraction musculaire ou encore à la réponse à la gravité. La recherche en mécanobiologie modifie en profondeur la biologie et ses applications en physiologie, physiopathologie et médecine.

En biologie, le développement de méthodes statistiques représente un enjeu considérable étant donnée l'importante variabilité des mesures, des fluctuations et du bruit. Les approches à l'interface de la physique et de la biologie visent notamment à déterminer les caractères communs qui sous-tendent certains mécanismes biologiques à différentes échelles moléculaire, cellulaire et tissulaire. Or, la présence d'interactions fortes et non homogènes à de nombreuses échelles, couplées à des effets hors équilibre, rend difficile les approches standard. Le développement d'outils de physique statistique comme les méthodes d'inférence ou l'apprentissage automatique (« machine learning ») apparaît donc crucial pour extraire des informations à partir des données expérimentales.

Enfin, il convient également de souligner l'apport précieux de la théorie (modélisation mathématique) à la compréhension des mécanismes à toutes les échelles d'organisation du vivant. La formalisation permet d'identifier les paramètres clés d'un système et de prédire son comportement lors de perturbation expérimentale contrôlée.

B. Importance des approches d'imagerie

Parmi les avancées technologiques considérables réalisées ces dernières années, l'imagerie à haute résolution tient une place importante. Les évolutions technologiques récentes dans ce domaine ont bouleversé les frontières établies et constituent une des pierres angulaires de la compréhension des mécanismes cellulaires et au cours du développement. Parmi ces évolutions récentes, l'attribution du Prix Nobel de chimie (2014) aux techniques de microscopie à très haute résolution témoigne de l'importance grandissante de ces microscopies de pointe, mais surtout de l'intérêt et de l'apport potentiel de ces technologies à la compréhension de mécanismes cellulaires déterminants. Ces technologies

ouvrent le champ des possibles et sont en perpétuelle évolution avec l'amélioration des méthodes optiques, de détection et d'acquisition mais également d'analyse. Ces techniques permettent aujourd'hui d'envisager des études cellulaires, voire subcellulaires, au sein d'organismes vivants ou en cours de développement. Elles permettent d'apprécier, à l'échelle nanométrique, des structures ou des complexes subcellulaires déterminants dans des phénomènes telles que la division, la prolifération, l'adhésion ou la migration cellulaire. Le suivi de molécules uniques avec une très haute résolution spatio-temporelle et l'analyse du comportement de ces molécules sont également possibles. Les récents développements en microscopie super-résolutive (STED, PALM, STORM, etc.) permettent de documenter le comportement de complexes protéiques à une échelle nanométrique et d'apprécier la diversité des mécanismes en place à l'échelle d'une cellule unique. Ces approches résolutive restent complexes si l'on s'intéresse à des organismes entiers, mais des évolutions récentes telles que la microscopie STED *in vivo* permettent d'envisager à moyen terme la visualisation de processus subcellulaires à très haute résolution dans un tissu ou un organisme vivant. Certaines approches d'imagerie, telles que la microscopie à feuillet de lumière, ont permis des avancées spectaculaires, notamment dans le domaine de la biologie du développement. Quand ces nouvelles méthodes d'acquisition, qui se caractérisent par une haute résolution spatiale et temporelle et une faible phototoxicité, sont combinées à des méthodes d'analyse de traçage ou lignage cellulaire, elles permettent de comprendre l'évolution d'une cellule unique, en rapport à ses voisines, à l'échelle d'un organisme entier en cours de développement. De plus, il est possible de rendre transparent, voire agrandir des échantillons volumineux et opaques tels que des organes entiers de souris, ce qui offre la possibilité d'entrevoir la complexité de réseaux cellulaires *in situ* à très haute résolution. Ces avancées continues, notamment dans le domaine de l'optique (Lattice Light sheet with adaptive optics), ont déjà permis d'accéder à la visualisation de mécanismes cellulaires com-

plexes au sein de petits organismes. Ces développements devraient à présent révéler la dynamique de ces mécanismes, ce qui n'était pas envisageable dans le passé car certains phénomènes requièrent des cadences d'acquisition de l'ordre de la milliseconde. Enfin, l'évolution des techniques de fluorescence et de microscopie intravivante, combinées à des méthodes corrélatives permet de sonder certains phénomènes à l'échelle d'organismes complexes tels que la souris à la fois par le prisme de la fluorescence, mais également celui de la microscopie électronique. Les méthodes de préparation d'échantillons pour la microscopie électronique connaissent également une évolution constante permettant d'accéder de mieux en mieux à la structure atomique de molécules au sein d'échantillons complexes. Il est évident que la microscopie, avec ses évolutions et améliorations, est à même de fournir un outil essentiel à la compréhension de la complexité du vivant. Il est crucial que ces approches et leur développement soient consolidés et largement utilisés pour favoriser la découverte de nouveaux mécanismes cellulaires et développementaux.

C. Interface avec la biologie structurale

Les récentes avancées des techniques de microscopie électronique ont permis l'émergence depuis quelques années d'une nouvelle interface entre la biologie cellulaire et l'étude de la structure tridimensionnelle des macromolécules biologiques. L'étude de la structure 3D des protéines ou d'autres macromolécules telles que les ARNs reposait jusqu'à présent essentiellement sur leur cristallisation, et l'analyse de la diffraction de rayons X par ces cristaux. Cette méthode implique une purification quasi parfaite des molécules et des complexes moléculaires, qui sont par conséquent sortis de leur contexte cellulaire, voire le plus souvent produits et purifiés à partir d'un autre organisme comme la bactérie. Le développement de la cryo- microscopie électronique permet

dorénavant d'étudier la structure des molécules non plus figées dans un cristal, mais dans l'état qu'elles adoptent en solution. La faible quantité de matériel nécessaire pour ce type d'étude rend plus facile la résolution de la structure de macromolécules et de complexes macromoléculaires purifiés directement à partir d'échantillons biologiques. Enfin, la cryo-tomographie électronique, donne accès à des informations structurales directement issues des échantillons biologiques, sans aucune étape de purification préalable, permettant d'accéder au fonctionnement des macromolécules directement au sein des cellules. Ce type de technique en plein développement va nécessairement bénéficier d'avancées méthodologiques prochaines pour la préparation des échantillons, l'acquisition des images et leur analyse et rapprocheront de fait la biologie cellulaire et la biologie structurale.

D. Interface avec la génétique

Les approches « omiques » (génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique), dites techniques à haut débit permettant d'appréhender la complexité du vivant dans son ensemble, se sont développées grâce à l'interface de plusieurs disciplines en biologie. En particulier, le séquençage des ARNm sur cellules uniques qui donne accès au profil d'expression de milliers de transcrits dans des milliers de cellules en faisant une seule expérience, a connu récemment une explosion dans le domaine de la biologie cellulaire et la biologie du développement. Cette technique devrait permettre à terme d'identifier tous les types cellulaires, d'expliquer la composition cellulaire des tissus et de comprendre ce qui fait l'identité d'une cellule. En parallèle, le suivi en temps réel d'une cellule au sein d'un tissu a été rendu possible grâce aux progrès de l'imagerie afin de caractériser des processus cellulaires dynamiques *in vivo*. Plus récemment, diverses méthodes se sont développées pour associer le séquençage de cellules uniques avec le lignage cellulaire en générant

des mutations précoces au cours du développement par la méthode CRISPR/Cas9, qui, tels des codes-barres génomiques, permettent de repérer les cellules et leurs descendantes. Ces approches devraient permettre de retracer le destin de chaque cellule au cours du développement mais de pouvoir également séparer ce qui est caractéristique d'une espèce de ce qui relève des variations individuelles. Ces différentes approches, qui peuvent même être utilisées simultanément, génèrent d'énormes quantités de données (« big data ») dont l'analyse peut s'avérer complexe. La représentation de ces résultats requière également de pouvoir développer et utiliser des algorithmes spécifiques. Ainsi, il est de plus en plus nécessaire d'avoir un accès facile et rapide à des moyens de stockage et d'analyse bio-informatique puissants, idéalement au sein de chaque unité, afin de permettre aux chercheurs d'exploiter au mieux leurs résultats.

IV. Points de vigilance et recommandations

A. Soutenir les initiatives structurantes et interdisciplinaires

La recherche française en biologie cellulaire et biologie du développement a grandement bénéficié des avancées technologiques de cette dernière décennie, que ce soit en microscopie, dans la préparation des échantillons biologiques, la cytométrie, l'édition du génome ou le profil d'expression génique sur cellule unique. La mutualisation des moyens entre centres de recherche d'un même site sous forme de plateformes dédiées a joué un rôle essentiel dans la diffusion et l'accès de ces techniques de pointe aux personnels de recherche. Préserver et améliorer cette mutualisation

représente un enjeu majeur. L'avancée des connaissances en biologie cellulaire et biologie du développement a également été stimulée par la coexistence de thématiques variées et la collaboration forte de ses chercheurs au sein d'unités de recherche multidisciplinaires. Ces échanges ont permis à différentes disciplines de s'éclairer les unes les autres en raison de leur complémentarité dans les domaines de la biologie moléculaire, la biologie structurale ou la biophysique. Cette diversité thématique et ces échanges entre disciplines doivent être, non seulement conservés, mais étendus par la création de centres interdisciplinaires, associant biologistes, physiciens, théoriciens, informaticiens et ingénieurs. Si ce mouvement est désormais enclenché sur plusieurs sites en France, il demeure la nécessité de mieux le soutenir au niveau institutionnel, notamment par davantage de recrutement de profils interdisciplinaires de haut niveau. À ce titre, se pose la question de savoir si les CID51 et 54, censées remplir cet objectif, sont suffisamment bien dotées. L'expérience de la section 22 laisse à penser que ce n'est pas le cas puisque nombre de candidats de valeur, certains étant même de purs théoriciens, se présentent à notre section avec des dossiers scientifiques qui nous sont parfois impossibles à expertiser. De ce constat découle la question de savoir s'il n'est pas temps de transformer ces CID en une section « approches interdisciplinaires du vivant », à part entière, dotée de son propre panel d'experts.

B. Optimiser et adapter les procédés d'évaluation

Contrairement au modèle anglo-saxon, l'organisation de la majorité des équipes de recherche de la section repose sur la présence de plusieurs chercheurs, ce qui constitue une opportunité incroyable en termes de moyens humains et de réflexion intellectuelle pour faire face à la compétition internationale. L'excellence de nombreuses équipes en biologie cellulaire et développement en témoigne. Elle

risque cependant de devenir inefficace si une réflexion n'est pas menée pour mieux définir le poste de chaque membre de l'équipe et reconnaître l'implication des CRCN en termes d'engagement collectif et de responsabilités d'encadrement. À cet égard, la création du grade CRHC a permis de débloquent la carrière de nombreux agents au dernier échelon de ce corps. Il faut cependant veiller à ce que cette progression de carrière ne soit pas l'apanage des femmes, les postes de directeurs de recherche devenant celui des hommes. L'autocensure des femmes et la ségrégation hiérarchique entre hommes et femmes restent une réalité et il faut espérer que le pourcentage de femmes qui se présentent aux concours augmente.

C. Veiller à l'équilibre des thématiques

Au cours de la dernière décennie, la diminution des financements de base et la part croissante des financements sur projets ont profondément influencé et orienté la recherche en biologie cellulaire et biologie du développement. En particulier, on constate que la biologie du développement souffre de l'image d'une discipline désuète ces dernières années. Ce constat est d'autant plus paradoxal que les avancées technologiques récentes, telles que les méthodes d'édition du génome, les méthodes d'imagerie, de fabrication d'organoïdes ou encore le séquençage sur cellule unique, permettent de prédire une véritable révolution dans notre compréhension des mécanismes régissant le développement à la fois aux stades embryonnaires et chez l'adulte, lors des processus de régénération. Le manque d'attrait pour cette discipline semble être un problème d'image, de perception et de visibilité. Pourtant, la biologie du développement est bien la discipline qui a enfanté la recherche sur les cellules souches embryonnaires ou induites qui promettent aujourd'hui des miracles en médecine régénérative. Il faut donc être vigilants et visionnaires pour continuer à finan-

cer et recruter au-delà des effets de mode car l'âge d'or de la biologie cellulaire et du développement est toujours devant nous. Il est essentiel de garder également à l'esprit qu'une recherche fondamentale forte dans ces domaines peut avoir des retombées majeures dans le domaine de la médecine et de la bioéthique, en apportant par exemple un éclairage quant aux prises de décisions concernant la fécondation *in vitro*, l'utilisation des cellules souches embryonnaires, les bébés génétiquement modifiés à l'aide de la technologie CRISPR-Cas9, etc. Par ailleurs, le faible taux de succès aux appels d'offre nationaux (ANR-CE13) pousse de nombreux chercheurs à orienter leurs travaux vers des projets de recherche ayant des objectifs plus appliqués ou permettant de publier plus rapidement. Le manque de moyens actuel nuit donc à la qualité de la recherche menée dans nos disciplines et à la liberté des chercheurs, pourtant essentielle pour une recherche d'excellence source d'innovation. En effet, les principales ruptures scientifiques et technologiques proviennent le plus souvent de recherches motivées par la curiosité. Pour une utilisation plus efficace des fonds publics, il convient de veiller aux critères d'éligibilité, de simplifier les procédures administratives, et d'assurer un bon équilibre entre les thématiques en vogue et celles plus confidentielles mais toutes aussi essentielles aux progrès des connaissances.

D. Protéger de la pression scientifique

Un accompagnement dans l'écriture des publications avec la création de bureaux d'édition au sein des instituts (au même titre que certains grands centres de recherche anglosaxons) et dans les demandes de financement permettrait de mieux valoriser l'ensemble des sujets de recherche développés dans les équipes et de renforcer les thématiques les plus fragiles. Par ailleurs, la pression toujours croissante pour publier dans des revues à haut facteur d'impact risque d'accroître les cas de

méconduites scientifiques, les exigences pour publier dans ces revues étant parfois impossibles à satisfaire. Actuellement, une des alternatives proposées est la Science Ouverte dont les contours mériteraient d'être mieux définis. La publication d'articles en Open access dans des revues prestigieuses ne diminue en aucun cas la course au facteur d'impact. Se pose également la question de l'évaluation de la qualité et de l'impact des articles déposés sur des plateformes ouvertes de type bioRxiv. Il n'est pas illusoire de penser qu'un système d'évaluation semblable à celui de la relecture par les pairs des journaux traditionnels (du type «Peer community in»: <https://peercommunityin.org/>) prenne de l'ampleur prochainement. Il est donc crucial et urgent qu'il soit orchestré par des institutions internationales adéquates.

Conclusion

La biologie cellulaire, la biologie du développement et l'évo-dévo sont des disciplines traditionnellement très fortes en France, notamment grâce aux laboratoires labellisés par le CNRS. Dans ces 3 disciplines, les écoles de pensée sont anciennes mais ont su constamment se ré-inventer grâce à un soutien institu-

tionnel fort, tel que le programme ATIP, et à une organisation optimisée en grands centres de recherche, permettant la mutualisation d'équipements de pointe très onéreux. Toutefois, on constate un étiolement progressif de certains secteurs, parfois à cause d'un déficit d'image, souvent à cause de manque de moyens financiers, ce qui conduit à un appauvrissement, voire à la disparition de savoirs et d'expertises uniques. Une partie de l'explication vient de la révolution technologique que connaissent les disciplines de la section 22 comme toutes les autres en biologie et qui tend à inverser la façon même de pratiquer la science. Lorsque précédemment il convenait d'émettre une hypothèse avant de tester sa valeur expérimentalement, on préfère aujourd'hui recueillir de grandes quantités de données sans biais expérimental et sans hypothèse préconçue, dont le traitement statistique, assistée de l'intelligence artificielle permettra d'échafauder des modèles théoriques plausibles et prédictifs. Ces changements s'ils sont pertinents sont très significatifs et nécessitent de former une nouvelle génération de chercheurs, au profil plus interdisciplinaire, plus technologique et plus polyvalent. Il ne faudra pas pour autant sacrifier le moteur essentiel du progrès scientifique que représente le simple émerveillement devant la beauté, la diversité et la complexité du monde vivant.

ANNEXE 1

Abréviations

Cryo-EM: Cryo Electron Microscopy

ESC: Embryonic Stem Cell

iPSC: induced Pluripotent Stem Cell

STED: STimulated Emission-Depletion

PALM: Photo-Activated Localization Microscopy

STORM: STochastic Optical Reconstruction Microscopy

SECTION 23

BIOLOGIE VÉGÉTALE INTÉGRATIVE

Composition de la section

Éric MARÉCHAL (président de section), Catherine BOYEN (secrétaire scientifique), Matthieu ARLAT, Cécile BOUSQUET-ANTONELLI, Yohann BOUTTE, Christel CARLES, Sylvie COURSOL, Alexis DE ANGELI, Philippe GIEGE, Kamel HAMMANI, Michael HODGES, Françoise IMMEL, Gwyneth INGRAM, Corinne KEICHINGER, Laurent LAPLAZE, Anja LISZKAY, Antoine MARTIN, Laurent NUSSAUME, Anne-Catherine SCHMIT, Sébastien STAERCK.

Résumé

La crise environnementale actuelle est marquée par une érosion de la biodiversité sans précédent, qui suscite des inquiétudes, un besoin de compréhension et la nécessité de proposer des solutions durables. Les organismes photosynthétiques, plantes et algues, sont au cœur de ces questionnements. Leur biomasse est à la base de la majorité des réseaux trophiques et ils jouent de ce fait un rôle critique dans la stabilité des écosystèmes. Les recherches fondamentales menées sur ces organismes par le CNRS permettent de générer les connaissances nécessaires pour faire face à des enjeux sociétaux majeurs, incluant la sécurité alimentaire, la transition énergétique, et de nombreuses applications allant de la santé à la chimie verte et au développement de nouveaux matériaux. Les efforts se sont focalisés sur quelques modèles d'études, qui constituent des pivots unificateurs de la biologie végétale,

seuls moyens de développer les connaissances suffisantes pour des thématiques aussi complexes que la biologie des génomes, le développement, la physiologie et les mécanismes de signalisation. Toutefois, l'évolution étonnamment sophistiquée des organismes photosynthétiques et les différents types de relations entretenues avec le microbiote environnant ont conduit à élargir le champ d'investigation à de nouveaux systèmes modèles. Ce rapport réaffirme donc l'importance de la recherche fondamentale sur la diversité des organismes photosynthétiques et des microorganismes qui leur sont associés. Les méthodologies multi-échelles, aux interfaces des niveaux moléculaires et écosystémiques, et les approches intégratives sont également présentées. Enfin, plusieurs actions de politique scientifique sont proposées pour renforcer la dynamique de la recherche nationale en biologie des organismes photosynthétiques.

Introduction

Ce document a été rédigé par les membres de la section 23 du CoNRS, en se basant sur une enquête réalisée auprès des directeurs d'unités dont les activités relèvent de la Biologie végétale intégrative. À ce titre, nous estimons qu'il reflète pour une grande part une position consensuelle de notre communauté.

Le contexte actuel est celui d'une crise environnementale sans précédent liée aux changements climatiques et aux activités anthropiques. La société a pris conscience de l'érosion brutale de la biodiversité. Elle exprime un besoin de compréhension, de solutions, avec une inquiétude légitime sur notre capacité à maîtriser, à défaut d'inverser, la dégradation des écosystèmes, à assurer la sécurité alimentaire et à opérer une transition énergétique radicale. À ces inquiétudes s'ajoutent celles des mutations qui touchent l'espace international, et *a fortiori* national, de la recherche, dans une situation budgétaire dégradée. Dans ce contexte, la recherche dans toutes ses dimensions, fondamentales, finalisées et appliquées, devrait être mobilisée. Les scientifiques consultés sont unanimes sur l'effort à fournir, mais expriment leur désarroi face aux limites budgétaires. Pour répondre aux urgences qui se multiplient sur de nombreux fronts, les priorisations semblent trop focalisées sur les demandes sociétales (programmation des appels à projets de la Commission Européenne et de l'ANR) alors que notre niveau de connaissance de base est encore insuffisant pour rationaliser une action efficace. Les appels d'offre de l'ANR ne permettent clairement pas de soutenir les efforts nécessaires de recherche fondamentale sur les organismes photosynthétiques et les microorganismes qui leur sont associés.

Les plantes et les algues (procaryotes et eucaryotes) sont la porte par laquelle le carbone entre dans la biosphère grâce au processus de photosynthèse. Toute la matière vivante est issue de cette capture du CO₂; la majeure partie du vivant sur la planète est directement

ou indirectement tributaire de cette production primaire. Un métabolisme énergétique et carboné unique, une exposition plus importante que les autres organismes aux paramètres fluctuants de l'environnement, des cycles de vie, des modes de reproduction, de croissance et de développement avec la contrainte d'une vie essentiellement immobile (organismes sessiles), sont autant de processus uniques au monde végétal.

Notre compréhension repose sur des modèles 'historiques', tels que la plante *Arabidopsis thaliana* ou l'algue verte *Chlamydomonas reinhardtii*, avec une richesse inégalée de données génétiques et phénotypiques, et pour lesquels les outils sont disponibles pour une étude fonctionnelle de l'ensemble de leurs gènes. Les techniques de manipulation et d'édition des génomes permettant de développer des approches fonctionnelles potentiellement sur toutes les cellules transformables, notre champ d'investigation s'est élargi à de nouveaux modèles.

Les mécanismes fondamentaux du vivant sont toutefois encore trop méconnus et trop peu conservés dans l'évolution pour permettre de comprendre, prédire et agir sur tous les types d'organismes photosynthétiques, et s'éloigner des modèles d'études 'historiques', en 'tournant la page'. Il ne faut pas négliger les travaux sur des modèles partagés par la communauté internationale. Ils constituent des pivots unificateurs de la biologie végétale, seuls moyens de développer les connaissances suffisantes pour des thématiques aussi complexes que la biologie des génomes, le développement, la physiologie et les mécanismes de signalisation.

Comme cela était anticipé dans le rapport précédent, la majorité des formes cellulaires de l'arbre du vivant s'est révélée complexe et très éloignée des schémas d'organisation d'*Arabidopsis* ou de *Chlamydomonas*, simples représentants de la 'lignée verte'. Les études métagénomiques de la biodiversité terrestre mais surtout marine ont mis en évidence que les deux tiers de la biodiversité des eucaryotes étaient issus de branches méconnues de l'évolution des organismes photosynthétiques. Les

‘nuages de mots’ correspondant aux modèles d’études des unités de la section 23 (voir Annexe 2), illustrent de façon frappante l’équilibre entre ‘plantes’ et ‘algues’, alors que le précédent rapport montrait que la communauté étudiait majoritairement les plantes terrestres. Le monde végétal étudié par les unités de la section 23 a donc élargi son assise. En combinant le besoin d’approfondir nos connaissances sur les modèles établis, et face au défi de déchiffrer des mécanismes fondamentaux inconnus dans des organismes dont on commence juste à aborder l’organisation, un des premiers objectifs de ce rapport est de réaffirmer la nécessité d’avancer au front des connaissances, guidés par la curiosité, mission du CNRS.

Le précédent rapport soulignait aussi à quel point les avancées technologiques avaient permis d’augmenter le flux d’expérimentations, d’analyses et de production de données, à toutes les échelles d’organisation. Aujourd’hui, grâce aux plateformes mises en place avec l’aide du Programme Investissement d’Avenir (PIA) et la structuration du GIS Infrastructures en Biologie Santé et Agronomie (IBiSA), les études peuvent viser l’intégration des informations diverses de type ‘omiques’, ainsi que l’établissement de liens entre ces données et des traits phénotypiques. Bien sûr, les efforts pour développer les plateformes analytiques correspondantes, mutualiser les moyens, harmoniser le fonctionnement en réseau et les ouvrir au plus grand nombre sont à poursuivre, comme pour toutes les sections de l’INSB. L’action de recherche menée au sein de la section 23 est particulièrement marquée par l’usage de stratégies multi-échelles, permettant de révéler les liens structuraux et fonctionnels des organismes (voir Annexe 2) : elle est donc sensible à la vitalité de ces plateformes. Nous soulignons ici le risque de vieillissement des moyens déployés, en absence de maintenance, conjugué au besoin de développer et accéder aux nouvelles technologies de pointe en séquençage, analytique, imagerie, etc.

Nous rapportons aussi que l’approche intégrative a atteint de nouvelles dimensions, per-

mettant de relier les niveaux cellulaires et organismiques au niveau des populations, des communautés et des écosystèmes. Une articulation est donc naturelle entre la section 23 et la section 20/INSB (Biologie moléculaire et structurale, biochimie) pour l’échelle moléculaire et avec la section 29/INEE (Biodiversité, évolution et adaptations biologiques : des macromolécules aux communautés) pour l’échelle écosystémique et évolutive. Une interaction avec la section 21/INSB (Organisation, expression, évolution des génomes. Bioinformatique et biologie des systèmes) est aussi à souligner concernant les approches intégratives et multi-omiques.

Parmi les éléments de contexte introductifs, les années récentes ont été marquées par un bouleversement du paysage universitaire et des organismes nationaux. Un mouvement profond de concentration vise à former des sites d’excellence de dimensions nationales voire internationales. Les chercheurs de la section 23 sont majoritairement membres d’UMR (~ 40), de quelques UMS, et de peu d’UPR, ERL ou de structures non CNRS. Quatre régions concentrent de grands contingents de chercheurs CNRS relevant de la section 23, en Île-de-France, Occitanie, Grand Est et Auvergne Rhône Alpes. Les recrutements opérés ces dernières années ont permis d’irriguer les unités dans des sites de petite taille, sur la base de l’excellence scientifique. Alors que le CNRS annonce une chute historique et durable des recrutements, une inquiétude s’exprime sur ce sujet d’hétérogénéité des sites universitaires, pour un organisme distribué sur le territoire national, et sur sa capacité à assurer la vitalité de toutes ses unités.

Les autres tutelles opèrent aussi des mutations qui impactent la recherche. Côté universitaire, la création des laboratoires d’excellence (Labex), souvent multi-sites, des initiatives d’excellence (IDEX) et des universités intégrées de rang mondial sont autant d’opportunités, avec des succès visibles, qui ne vont toutefois pas sans risques. La construction de très grandes UMR peut engendrer une dilution ou une perte d’identité thématique, où la nouvelle position d’équipes autrefois très perfor-

mantes et visibles a conduit à une déstructuration dommageable. Ces effets parfois négatifs touchent bien sûr toute la biologie. Le bilan global est cependant encourageant, si on considère par exemple le nombre d'équipes lauréates de l'ERC (depuis 2014, 5 ERC Starting et 4 ERC Advanced grants, soit presque 2 par an) et la qualité de production scientifique des équipes relevant de la section 23. En plus des universités, de nombreuses UMR de la section impliquent des organismes eux même en mutation. L'INRA va fusionner en 2020 avec l'IRSTEA, formant l'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement). Cette évolution élargit le champ thématique partagé avec le CNRS, non seulement sur le sujet de l'agriculture, mais aussi sur l'environnement. Le CEA, autre tutelle majeure très visible sur les recherches menées sur la photosynthèse, opère un recentrage sur des axes, tels que la fermeture du cycle du carbone et les énergies décarbonées, thématiques qui peuvent aussi être structurantes pour la section 23. Enfin, l'intensification des recherches sur les micro-algues souligne des convergences possibles avec l'IFREMER et la montée en puissance des modèles biologiques marins.

Concernant la valorisation et le rôle des unités relevant de la section 23 face aux défis sociétaux, les recherches touchent de façon de plus en plus évidente la partie la plus sensible des écosystèmes, les organismes qui jouent le rôle de producteurs primaires conditionnant la vie sur notre planète. Les interactions abiotiques et biotiques (intra et interspécifiques, incluant virus, microbiotes, symbiotes et pathogènes) sont autant de sujets pour aborder la place des végétaux dans les écosystèmes naturels ou cultivés. La valorisation des travaux est un enjeu non seulement pour l'agriculture, souvent citée, mais pour d'autres formes de valeur, incluant les services écosystémiques (mode de valorisation aussi souligné par la section 29/INEE), ou le potentiel de ces organismes pour capturer le CO₂ et développer des solutions durables pour la nutrition, la santé, la chimie verte ou les bioénergies. Il est intéressant de noter que de plus en plus, les projets de recherche développés dans les unités de la section intègrent ces enjeux, illustrant à quel

point le CNRS se révèle un acteur incontournable de l'articulation de la recherche fondamentale avec ces différents modes de valorisations.

Dans la suite de ce document, nous nous efforçons d'analyser le rôle joué par la Biologie végétale intégrative du CNRS dans le dispositif national de recherche. Nous ferons ensuite des recommandations susceptibles de renforcer la dynamique nationale dans ce secteur.

I. La place du CNRS dans l'avancée des recherches sur les organismes photosynthétiques

A. Diversité évolutive des organismes photosynthétiques : un champ d'exploration encore vaste et un enjeu majeur face aux défis sociétaux et climatiques

1. Comprendre la diversité évolutive, structurale et fonctionnelle de la photosynthèse et l'exploiter pour des approches à l'interface de la chimie et de l'agriculture

La photosynthèse est apparue il y a plus de 3,5 milliards d'années, façonnant l'atmosphère, le climat et la vie. L'étude de la récupération de la lumière, de la conversion de l'énergie et des réactions de transfert électron/proton sont d'excellents exemples du succès de la recherche interdisciplinaire : biologie, biochimie, physique, spectroscopie avancée, nouveaux développements en microscopie et biologie structurale. Bien que les principaux complexes protéiques/pigments soient communs à tous les

organismes effectuant la photosynthèse oxygénée, des différences dans la régulation de la récupération de la lumière et du flux d'électrons nécessitent un effort important de recherche. Notre compréhension du transport photosynthétique des électrons permet d'aborder ces questions fondamentales à un niveau moléculaire très profond, inaccessible dans d'autres systèmes biologiques.

La façon dont les organismes photosynthétiques s'acclimateront et s'adapteront aux changements environnementaux anticipés constituera un axe de recherche majeur au cours de la prochaine décennie. Les organismes photosynthétiques sont plus exposés au stress oxydatif que tous les autres. Les chlorophylles permettent de convertir la lumière en énergie chimique, mais aussi, de créer de l'oxygène, une molécule très oxydante et potentiellement toxique. Différents mécanismes de protection restent à élucider. Les organismes photosynthétiques sont équipés d'un système antioxydant hautement efficace, et les mécanismes de protection et les protéines participant à des voies alternatives de transport d'électrons se sont diversifiés au cours de l'évolution, diversité qui commence à peine à être comprise chez les plantes supérieures mais aussi dans divers groupes d'algues. Pour ces modèles, les scientifiques du CNRS ont un leadership reconnu.

Des recherches multi-échelles doivent être menées pour obtenir une vision intégrée de différents aspects de la photosynthèse, y compris la complexité des interactions métaboliques, telles que l'action des métabolites photo-respiratoires sur les activités photosynthétiques. La différenciation des plastes non-photosynthétiques en chloroplastes, et inversement, reste mal comprise. La relation entre la photosynthèse, et l'autre grand mécanisme bioénergétique, commun cette fois-ci à l'ensemble des eucaryotes, à savoir la respiration, est aussi une question captivante à élucider. Les bases moléculaires de l'autotrophie, de l'hétérotrophie et de leur combinaison sous forme de mixotrophie, commencent juste à être déchiffrées. Enfin, plusieurs avancées récentes sont encourageantes pour compren-

dre les bases moléculaires de la signalisation rétrograde du chloroplaste vers le noyau, essentielle pour les réponses d'acclimatation. Nos connaissances sur tous ces sujets bénéficient d'avancées majeures de scientifiques du CNRS en partenariat fort avec le CEA.

Outre ces mécanismes fascinants qui inspirent la recherche fondamentale, la photosynthèse est devenue l'axe principal de programmes de recherche internationaux sur l'amélioration des rendements agricoles, grâce aux récents succès obtenus en manipulant les cycles photo-respiratoire et de Calvin ou les voies de photo-protection. Les scientifiques du CNRS sont très actifs dans ce domaine. Dans le cadre de la recherche de solutions pour développer des énergies renouvelables, les recherches sur les modules de conversion énergétique de la lumière dans des systèmes biomimétiques (photosynthèse artificielle), représentent un enjeu à l'interface entre la section 23 pour l'INSB et les sections 11, 12, 14, 15 et 16 de l'INC. Reconnus pour leur excellence, le CNRS et le CEA participent à des initiatives européennes telles que le programme SUNRISE, visant à trouver des solutions permettant la conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique avec une efficacité supérieure à celle des organismes photosynthétiques. Dans le cadre d'une autre initiative, CROPBOOSTER-P, le CNRS et l'INRA participent à la préparation des projets européens pour l'amélioration des rendements des cultures, la séquestration du carbone et l'utilisation rationnelle de l'eau. Ces initiatives ne sont, à ce jour, pas encore mûres, mais elles permettent d'identifier un besoin de structuration dans un avenir proche.

2. Approfondir la connaissance des modèles établis d'organismes photosynthétiques, consolider les modèles émergents et identifier de nouveaux modèles pertinents

Les modèles d'études dominants cités plus haut, ont été choisis il y a plusieurs décennies comme des objets d'études manipulables, avec des génomes séquencés, des informations, des

outils et des ressources partagées. Notre connaissance y est profonde et permet de poser des questions sur la complexité et le raffinement de processus biologiques. Les approches intégratives et multi-échelles y trouvent leur expression la plus aboutie.

Côté plantes, quelques autres modèles populaires permettent de poser certaines questions particulières, liées par exemple au développement floral, avec *Antirrhinum* ou le pétunia, à la phytonutrition et au développement en lien avec des performances agricoles, avec le blé, le riz, le colza, le maïs et la tomate. Certains modèles sont des couples entre espèces, permettant de poser la question des associations symbiotiques, telles que *Medicago* avec *Sinorhizobium meliloti* (bactéries fixatrices d'azote) ou avec *Rhizophagus irregularis* (champignon mycorhizien à arbuscules), ou encore des pathosystèmes, tels qu'*Arabidopsis* avec des bactéries pathogènes comme *Ralstonia solanacearum* ou *Xanthomonas campestris*. Quelques modèles non-angiospermes ont été introduits, par exemple la mousse *Physcomitrella patens* étudiée dans quelques unités, permettant d'interroger la conservation ou la spécificité de mécanismes fondamentaux chez les plantes non vasculaires.

Les années récentes ayant attiré l'attention sur des pans méconnus de la biodiversité ou grâce à la possibilité de travailler directement sur toutes les plantes d'intérêt, nous avons observé la chute des financements correspondants aux modèles historiques. La situation est critique pour *Arabidopsis*, en période de doute sur la transférabilité des connaissances aux modèles agricoles, en particulier par des approches OGM. Le développement de collections de plusieurs centaines d'accessions d'*Arabidopsis* (variants génomiques), associé à des approches de génétique quantitative, a revitalisé les études sur ce grand modèle, qui reste actuellement le mieux connu en Biologie Végétale, et sur lequel il sera important d'affirmer le besoin de poursuivre notre déchiffrement approfondi.

Côté algues, il est important de rappeler la place de la France dans l'émergence et la popularisation de modèles marins, tels que l'algue

verte *Ostreococcus taurii*, l'algue rouge *Chondrus crispus*, les algues brunes *Ectocarpus siliculosus* et *Saccharina latissima*, et la diatomée *Phaeodactylum tricoratum*. Chacun de ces modèles permet de poser des questions fondamentales représentatives de grands clades de l'arbre de la vie. Un nombre croissant d'unités de la section 23 a développé ou s'est emparé de ces modèles, donnant une forte visibilité de la science française sur les thématiques correspondantes.

L'exploration de la biodiversité conjuguée aux avancées des méthodes de séquençage, de transformation et d'édition génomique ouvrent le champ des investigations. Il est possible de poser des questions autrefois inabornables du fait de l'allopolyploïdie du blé, du colza ou de la caméline. Certains modèles sont issus de l'intérêt que leur porte l'industrie, telle l'algue *Nannochloropsis* pour les biocarburants, ou encore de leur pathogénicité pour l'humain, tels les parasites apicomplexes conservant des plastides non-photosynthétiques, *Plasmodium* ou *Toxoplasma*. Il est aussi important de réaffirmer l'intérêt de développer des études sur certains modèles bactériens ou fongiques en lien avec des processus spécifiques des végétaux.

Enfin, il convient de mentionner l'apparition de systèmes modèles plus complexes, pour les thématiques posant les questions des associations inter-espèces plus larges, en particulier les holobiontes. Le recul n'est actuellement pas suffisant, mais il s'agira d'une thématique pour la communauté scientifique dans un futur proche. Les questions posées s'ouvrent notamment à la coévolution, la sélection naturelle. Des collections de variants naturels sont développées, par exemple sur la tomate, et seront à encourager, permettant d'offrir des outils manquants pour l'agriculture et pour aborder les questions nécessaires aux développements de l'agroécologie.

Il est ambitieux d'afficher ce besoin de maintenir à la fois un effort de recherche pour une connaissance plus approfondie des modèles établis, et la nécessité de soutenir l'émergence de nouveaux modèles. Les unités de la section rapportent cette diversification de

leurs modèles d'études (voir Annexe 2). L'évolution des technologies de séquençage, multi-omiques, d'imagerie à haute résolution, d'édition de génomes, de Tilling, de génération de populations non-OGM, etc, peuvent aider à mener cet effort. Il apparaît qu'un point important résidera dans la faculté à consolider des réseaux et des communautés scientifiques sur ces nouveaux modèles, et que ceci sera probablement un enjeu d'avenir.

3. Développer les approches évo-dévo

Bénéficiant de cette possibilité d'explorer virtuellement tout le vivant, un enjeu d'avenir sera de construire des modèles prédictifs, s'inspirant de stratégies évo-dévo. Certains rôles ou modes de fonctionnement de composants essentiels des systèmes biologiques peuvent en effet se révéler par l'étude de leurs origines, leur phylogénie, l'évolution de leurs fonctions, des réseaux qu'ils contrôlent et de leurs propriétés biochimiques. Des études génomiques et bioinformatiques créatives, innovantes, seront en ce sens indispensables pour décoder et manipuler les informations *cis* et *trans* cryptées dans les génomes. Le CNRS est très bien positionné sur ces thématiques.

B. Plasticité génotypique et phénotypique : une caractéristique essentielle des organismes photosynthétiques

1. Élucider les relations entre organisations, architectures, dynamiques et régulations des génomes, en lien avec la plasticité des réponses phénotypiques

L'étude du contrôle de l'expression des génomes, incluant les régulations épigénétiques, (épi) transcriptionnelles, post-transcriptionnelles, et traductionnelles, permet de comprendre une partie de la plasticité génotypique et phénotypique remarquable des orga-

nismes photosynthétiques. Ces processus sont coordonnés au niveau de trois génomes : nucléaire, mitochondrial et chloroplastique. Les machineries moléculaires impliquées ont une composition et un mode d'action dont la caractérisation ne fait que commencer.

Les génomes nucléaires des organismes photosynthétiques présentent une très grande diversité intra et interspécifique de taille, sous l'effet d'expansions et de contractions d'éléments transposables. Les mécanismes précis par lesquels ces éléments transposables, ainsi que les introns, agissent sur la biologie, la taille et l'évolution des génomes, restent à élucider. Les équipes du CNRS abordent ces questions, souvent en partenariat avec l'INRA, grâce à des approches originales comparant espèces sauvages et domestiquées ou des polyploïdes naturels ou synthétiques. Des études interdisciplinaires impliquant prospections, approches théoriques et expérimentales, et exploitation massive des données de séquençage, sont et seront déterminantes pour déchiffrer le rôle des transferts et duplications de gènes, dans l'émergence et l'évolution de traits phénotypiques, en lien avec certaines contraintes biotiques et abiotiques.

Les plantes présentent par ailleurs des processus de régulation de la chromatine utilisés à un degré inégalé parmi les eucaryotes. Il est important de rappeler que plusieurs mécanismes épigénétiques fondamentaux ont été initialement révélés chez les végétaux, notamment par des équipes françaises, et que nombre de ces mécanismes sont uniques aux organismes photosynthétiques. Ces processus modulent les propriétés physicochimiques et l'accessibilité de l'ADN, impactant l'expression par des événements de régulation multi-échelles. Les avancées récentes concernent les niveaux d'observation, de l'architecture du noyau à la topologie du génome en passant par la réorganisation de domaines au sein de l'espace nucléaire et la composition de la chromatine. Un premier enjeu est de prendre en compte les échelles spatiotemporelles, et développer des approches épigénomiques en cellule unique. Un second enjeu, au-delà des plantes modèles, est de développer des projets

translationnels visant à découvrir des variants épigénétiques chez les plantes d'intérêt agronomique et en milieu naturel. Enfin, l'édition des épigénomes promet d'être déterminante pour établir des liens de causalité entre marques épigénétiques et expression de gènes. Jusque-là surtout développée sur cellules animales, elle devra être appliquée sur végétaux entiers. L'ensemble de ces enjeux est pris en compte au sein du GDR EPIPLANT.

Parmi les acteurs des régulations transcriptionnelles et post-transcriptionnelles, de nouvelles familles de gènes nucléaires codant des protéines de liaison à l'ARN à architecture modulaire se sont récemment révélées essentielles, en particulier dans les mitochondries et les chloroplastes. Des études biochimiques et structurales révèlent une analogie fonctionnelle remarquable avec des petits ARNs régulateurs bactériens. Ceci ouvre la voie à l'ingénierie de nouvelles protéines permettant de réguler à façon l'expression de gènes *in vivo*. Il sera donc essentiel d'étudier les voies de signalisation régulant leur activité.

L'étude des régulations épi-transcriptomiques constitue un domaine émergent majeur sur lequel le CNRS doit se positionner. Les patrons des modifications chimiques des ARN qui contrôlent l'expression des gènes sont cruciaux dans les processus de développement et de survie aux contraintes environnementales chez l'ensemble des eucaryotes. Le catalogue des modifications et de leurs patrons dynamiques ainsi que leurs rôles moléculaires et physiologiques restent à découvrir chez les organismes photosynthétiques. Déterminer la variation de ces patrons en réponse à divers stimuli, ce qui constitue un niveau de plasticité supplémentaire de la régulation de l'expression génétique, est aujourd'hui un enjeu majeur. Il sera crucial d'investir rapidement dans ce nouveau domaine au regard de l'intense compétition internationale qui s'impose d'ores et déjà.

La dernière étape de l'expression génétique, la traduction, reste la plus méconnue chez les plantes et les algues. Une des premières réponses au stress consiste à réduire globalement la traduction tout en favorisant celle de

transcrits de survie et d'acclimatation. Les questions visant à identifier la nature et la diversité des appareils traductionnels, la régulation de la traduction et la co-régulation d'ARNm codant des facteurs impliqués dans un même processus relèvent de la recherche fondamentale et représentent des défis d'avenir à mener d'abord chez les plantes modèles, mais aussi dans des espèces cultivées, afin de mieux appréhender les mécanismes de réponse aux stress. Chez les organismes photosynthétiques marins, ces problématiques sont d'autant plus importantes que notre connaissance de la traduction y est quasiment nulle.

2. Comprendre les modes de reproductions, des mécanismes moléculaires aux cycles de vie et aux flux de gènes

Les stratégies de reproduction ont une diversité et une complexité de mécanismes qui font partie des spécificités les plus spectaculaires du monde végétal (double fécondation des plantes à fleurs, reproduction asexuée par graine -apomixie-, multiplication végétative d'explants totipotents variés, cycles de vie sexué ou asexué, toute la gamme d'alternances générationnelles possibles haplodiplophasiques chez les algues). Concernant les mécanismes moléculaires, plusieurs unités de la section 23 déchiffrent les mécanismes fondamentaux communs à l'ensemble des eucaryotes. Dans le cadre de la reproduction sexuée, la méiose est un moteur de biodiversité et d'évolution. Cependant, la compréhension moléculaire sous-jacente à cette dynamique éco-évolutive est encore peu connue. Les approches cellulaires et moléculaires ont permis d'aborder sur divers modèles dont *Arabidopsis*, la mécanistique d'appariement des homologues, la fonction des complexes synaptonémaux et les processus de régulation des échanges chromosomiques qui restent pourtant fort obscurs. La mise au point récente d'un protocole de préservation tridimensionnelle des méiocytes mâles donne par exemple accès à l'organisation tridimensionnelle du génome et à sa dynamique. Ces aspects molé-

culaires s'intègrent aussi dans une nouvelle vision de la reproduction allant du gène vers l'écosystème et l'évolution des génomes à l'échelle des populations. En effet, les duplications et remaniements des copies géniques ainsi que les flux de gènes d'une population à une autre, impactent la biodiversité et la compétition au sein des populations et façonnent la structure, le cycle de vie et la dynamique des communautés végétales de génération en génération. Concernant plus spécifiquement les plantes, entre autres cultivées, les avancées futures bénéficieront d'approches à grande échelle comme le Genome Wide Association (GWA) mapping, et les progrès en mutagenèse dirigée et cribles génétiques associés, et sont transposables à d'autres organismes photosynthétiques. Concernant les modèles d'algues, le champ d'exploration est actuellement grand ouvert, avec des questions sur le déterminisme des cycles générationnels, de l'acquisition de la sexualité et de ses traits phénotypiques, qui restent à déchiffrer, des aspects moléculaires aux aspects évolutifs et écologiques. L'ensemble de ces questions bénéficie de la contribution d'équipes de forte visibilité internationale de l'INSB.

3. Déchiffrer la plasticité cellulaire et développementale, des mécanismes moléculaires à la morphogenèse cellulaire et à la formation des organes

L'architecture des organes et tissus dépend de la différenciation des structures cellulaires et subcellulaires à partir de cellules souches contenues dans les méristèmes. Contrairement aux animaux, l'organogenèse des végétaux prend place tout le long de la vie. Les étapes précoces (embryogenèse) conduisent à la définition des grands axes de l'organisme et la mise en place des méristèmes. La plasticité développementale s'illustre par un processus de différenciation cellulaire réversible (totipotence), peu sensible au lignage. Les variations environnementales peuvent ainsi façonner la physiologie et le développement. Entre autres, la lumière module la mise en place de l'appareil photosynthétique, modifie l'élongation cellu-

laire, contrôle le phototropisme négatif de la racine, et déclenche la floraison. La relation à la lumière est donc un sujet unificateur et structurant, au-delà de l'étude de la photosynthèse et de sa régulation.

L'origine de la plasticité développementale des plantes repose sur la structuration de réseaux de gènes complexes. L'étude et l'inférence de la dynamique des réseaux régulateurs génétiques et épigénétiques est une clé pour comprendre les propriétés émergentes qui en découlent. Des équipes pluridisciplinaires associant biologie, mathématiques, sciences de l'information, physique et chimie devraient pouvoir être consolidées, sur ce sujet, au sein du CNRS.

La plasticité développementale est aussi à chercher dans les échanges cellulaires, impliquant hormones, peptides signaux et récepteurs. La compréhension des mécanismes moléculaires de biosynthèse, perception et transport des signaux hormonaux est un domaine de recherche très dynamique au CNRS. Les interactions entre signalisations multi-hormonales et homéostasie de nutriments, commencent à être déchiffrées. Certains transporteurs jouent un rôle direct dans la signalisation des substrats transportés car ils sont aussi des récepteurs ('transcepteurs'), ou indirect lorsqu'ils transportent de façon compétitive une hormone végétale ou un ion.

L'échange d'information par le mouvement de (poly)peptides permet par ailleurs l'intégration de la physiologie et du développement en relation avec les signaux environnementaux. Caractériser les vecteurs de cette information et la régulation (moléculaire, cellulaire, physique) de leur trafic, élucider les cascades moléculaires en aval de leur perception, et comprendre les nœuds d'intégration et la priorisation des informations reçues sont donc des enjeux importants.

L'environnement physique des cellules végétales est marqué par la présence d'une paroi lignocellulosique et l'exercice d'une pression de turgescence forte. Sa perception et son interprétation par les cellules pour orienter croissance et morphogenèse restent mal

comprises. Un aspect très important et novateur dans ce domaine est la mécano-perception qui lie paroi, membrane plasmique et événements en aval de la signalisation. Obtenir une vision dynamique et intégrée de ces paramètres physiques, comprendre leur influence sur le continuum paroi-membrane-cytosquelette-noyau et élucider les mécanismes de mécano-perception des végétaux représentent des défis clés. La différenciation des membranes intracellulaires et l'aiguillage du trafic des protéines vers des domaines polarisés de la cellule conditionnent la direction des axes de croissance. La membrane plasmique intègre les signaux environnementaux et mécaniques en cascades de signalisation qui débouchent sur le contrôle de la différenciation et l'acquisition ou le remodelage de la polarité cellulaire.

Les communications inter et intra-cellulaires reposent aussi sur l'interaction entre protéines et lipides membranaires et requièrent des approches interdisciplinaires pour les comprendre. La composition des membranes est basée sur l'immense diversité des lipides et leur dynamique d'interaction. Nous savons aujourd'hui que de nombreux lipides et dérivés, jouent un rôle prépondérant dans la dynamique et la signalisation membranaire. Il devient essentiel de comprendre les assemblages de tous ces composants, et les unités de la section 23 sont dans une position forte pour aborder ce niveau de complexité systémique.

Pour toutes ces questions, l'association de l'imagerie *in cyto* super-résolution ('single molecule'), du suivi multidimensionnel de la distribution des hormones de croissance au sein d'un organe ('4D live imaging'), le développement de nano-senseurs (hormonaux, métaboliques, mécaniques) et la micro-fluidique devraient permettre d'obtenir une vision dynamique et quantitative des architectures végétales.

Une thématique combinant quasiment toutes les approches citées plus haut, portée par quelques unités très visibles de l'INSB, concerne la différenciation d'organes à partir de structures méristématiques et la formation de la fleur. L'approche multi-échelle trouve ici une puissance particulière, allant du déchif-

frage moléculaire au rôle des fleurs dans le succès évolutif des plantes terrestres. On note que les aspects développementaux sur le modèle 'arbre', bien qu'importants, ne sont pas couverts à l'INSB, ce qui peut représenter une limite dans les interactions avec la section 29.

Enfin, un grand défi reste la prédiction des phénotypes. Une trans-disciplinarité (biologie, écologie, physique, chimie, mathématiques) devrait être instrumentale pour transiter vers une modélisation génotype x épigénotype x environnement. Ces approches devront être déployées sur des systèmes reposant sur une connaissance et une masse critique suffisante.

C. Relations avec l'environnement : les organismes photosynthétiques en première ligne face aux changements climatiques

1. Interactions avec les facteurs abiotiques : vers une compréhension intégrée de la perception, de la nutrition et des stress

Les contextes environnementaux auxquels les végétaux font face peuvent varier de façon graduelle ou brutale au cours des journées, des saisons et des années. Dans tous les cas, le végétal (plantes ou algues) ne se déplace pas pour s'y soustraire. Pour les organismes terrestres, l'environnement aérien présente les plus fortes variations de lumière, température, humidité, auxquelles s'ajoute la grande disparité rencontrée au niveau du sol (disponibilité des nutriments, ressources hydriques, pH, polluants). L'environnement aquatique présente une gamme semblable de variations, avec des chocs thermiques ou salins, une acidification liée au réchauffement climatique, des charges anormales en nutriments issus des pratiques agricoles et l'exposition à toute une variété d'émissions anthropiques (métaux, perturba-

teurs endocriniens, polluants). Dans tous ces systèmes, quelques nutriments semblent plus critiques et sont l'objet d'étude de plusieurs unités de l'INSB : l'azote, le phosphore et le fer.

Face à ces contraintes, les organismes photosynthétiques montrent une remarquable capacité d'adaptation, par des mécanismes moléculaires très divers et complexes. La vision actuelle, à laquelle plusieurs unités de la section 23 ont contribué, est celle de la combinaison de mécanismes généraux spécifiques des grands groupes végétaux, au moins terrestres, et une diversification de mécanismes plus spécifiques. Beaucoup de fonctions adaptatives ont été inventoriées en relation avec l'environnement abiotique, par exemple la perception de la lumière, de la gravité, l'ouverture des stomates et la régulation des transporteurs d'ions. La réponse aux stress lumineux, par divers systèmes de photo-protection, est liée à l'étude de la photosynthèse, détaillée plus haut. En revanche, nos connaissances sur la plupart des voies de signalisation associées restent parcellaires et de nombreux acteurs restent à identifier et à caractériser.

Il est frappant de constater que la diversité des contextes environnementaux peut être mise en parallèle avec la multiplication des acteurs impliqués dans les réponses à ces changements. C'est le cas par exemple, pour les gènes codant certaines familles de transporteurs (d'ions ou d'eau), de récepteurs membranaires, de facteurs de transcription et de nombreux autres acteurs des cascades de régulation : ils sont clairement plus nombreux et divers chez les organismes photosynthétiques que chez les autres organismes. La complexité des réponses est à mettre en parallèle avec certaines spécificités au niveau d'organes, de tissus, de cellules et de compartiments cellulaires. Le développement d'outils permettant d'analyser la perception des différents signaux abiotiques (et biotiques) au niveaux cellulaire (voir intracellulaire) a permis de grands progrès qu'il faut amplifier pour obtenir une réponse intégrée à la plante entière.

Enfin, les processus impliqués dans les interactions avec l'environnement abiotique ne sont pas cloisonnés et de nombreuses

études récentes ont montré l'importance de prendre en compte les coordinations entre voies de signalisation. Les capacités de nombreux transporteurs à prendre en charge de façon compétitive des substrats aussi distincts que des ions ou des hormones illustre la nécessité de considérer des mécanismes impliquant des acteurs moléculaires de natures différentes.

Les études multi-stress sont cruciales si l'on souhaite prendre en compte la complexité de l'environnement, mais elles doivent être soigneusement sélectionnées sur la base de l'impact physiologique pour éviter une dispersion de moyens. Dans ce cadre les plateformes de phénotypage qui permettent de se rapprocher de conditions réelles et d'étudier l'ensemble de l'organisme (la racine a ainsi été souvent négligée par le passé car peu accessible visuellement), devront être développées, consolidées et/ou exploitées plus largement.

2. Interactions biotiques : explorer et comprendre la diversité des relations intra et interspécifiques impliquant les organismes photosynthétiques

Les organismes photosynthétiques vivent en association stable ou variable avec une grande diversité de microorganismes (virus, bactéries, archées, champignons, etc.) dans des environnements fluctuants. Il est aujourd'hui clair que l'hôte et son microbiote forment une entité fonctionnelle appelée 'holobionte'.

Jusqu'à présent, les études portant sur les interactions entre plantes et microorganismes, pathogènes ou mutualistes, se sont appuyées sur des systèmes modèles simplifiés dans des conditions favorables au développement des interactions et donc assez loin des conditions naturelles et ne tenant que très peu compte de l'holobionte. Ces études conjuguant génétique, épigénétique, génomique, biologie moléculaire, biochimie, physiologie et cytologie ont néanmoins permis d'identifier des mécanismes moléculaires fondamentaux gouvernant les interactions, que ce soit au niveau cellulaire, tissulaire ou à celui de la plante entière. Elles ont notamment permis d'établir la notion d'une

immunité végétale à deux niveaux, avec une 'PAMP Triggered Immunity' intervenant dans la perception des PAMPS/MAMPS (Pathogen Associated Molecular Pattern/Microbial Associated Molecular Pattern) et une 'Effector Triggered Immunity' impliquée dans la reconnaissance des effecteurs produits par les pathogènes. Ces travaux ont permis de dégager les modèles de 'garde', de 'leurre' ou plus récemment de 'leurre intégré' et la notion de 'résistosome'. Plusieurs unités du CNRS en collaboration avec l'INRA, l'IRD et le CIRAD, ont largement contribué au développement de ces avancées conceptuelles. Un défi majeur consiste maintenant à déterminer comment s'intègrent les différentes voies de signalisation liées à la susceptibilité ou à la résistance et en étudier le caractère universel sur des modèles plus complexes prenant en compte l'holobionte. Il est également important de mieux caractériser les nœuds de régulation permettant d'équilibrer la réponse des plantes soumises à la fois à des stress biotiques et abiotiques. La spécificité d'hôte ou de tissu demeure aussi une question clé.

Dans le cadre des interactions mutualistes, les signaux des symbiotes, leur perception et leur transduction par l'hôte ont été caractérisés de manière très détaillée. Ces études ont ainsi permis de mieux caractériser les bases fonctionnelles de ces interactions et leur rôle dans la 'fitness' des plantes. Les études comparatives ont permis de caractériser les spécificités et les caractéristiques partagées entre symbioses fixatrices d'azote et mycorrhiziennes et d'en retracer l'évolution. L'avènement de la génomique a permis de mieux appréhender la complexité des systèmes sur lesquels reposent les concepts développés sur les systèmes modèles. Ces approches génomiques ont permis de les étendre à des interactions qu'il était plus difficile d'étudier jusqu'alors par des analyses classiques. La génomique comparative et les études d'association pangénomique représentent des leviers extraordinaires pour étudier l'évolution des interactions plantes-microorganismes et la coévolution des partenaires. Les études d'évolutions expérimentales sont également des approches intéressantes pour étudier cette co-évolution. Il est donc aujourd'hui possible d'avoir une vision beaucoup plus intégrée

et réaliste en élargissant le panel des populations ou des interactions étudiées. Plusieurs unités de l'INSB sont en pointe sur ces approches. Il reste néanmoins nécessaire de poursuivre et d'amplifier les études mécanistiques de manière coordonnée et ciblée sur les différents partenaires d'une interaction (hôte et microorganismes) et d'appuyer ces travaux par des approches de modélisations *in silico*. Il est en particulier nécessaire de mieux caractériser les échanges métaboliques qui sous-tendent ces interactions en renforçant les approches de métabolomique. De même, ces interactions doivent être abordées avec le souci de développer des approches de biologie des systèmes pour intégrer les différents niveaux d'interactions, de la molécule à l'holobionte, et en tenant compte des fluctuations environnementales. Le but étant finalement de comprendre comment l'holobionte répond à ces variations et de déterminer ainsi l'impact du microbiote sur la santé et le développement des organismes photosynthétiques.

Les approches de métagénomique permettent d'avoir des informations précises sur la composition des communautés microbiennes associées aux organismes photosynthétiques (endosphère, phyllosphère, rhizosphère pour les plantes terrestres) et d'en étudier les variations ou spécificités en fonction de paramètres liés à l'hôte ou aux conditions environnementales. La métagénomique, qui permet aussi de caractériser les viromes ou les microbiomes, doit cependant passer de la phase encore très descriptive à une phase plus fonctionnelle et écologique pour aider à élucider les mécanismes régissant la formation du microbiote et évaluer son impact sur l'hôte. Cela passera vraisemblablement par le développement de systèmes modèles robustes, l'utilisation de communautés synthétiques (SynComs) et l'étude de mutants ciblés ou le lancement de programmes de mutagenèse par Tn-seq. Des analyses méta-fonctionnelles devraient permettre à terme d'identifier des microorganismes ou des communautés microbiennes permettant aux végétaux de mieux résister aux infections et/ou aux stress abiotiques, un défi majeur pour le développement de l'agroécologie dans le contexte des changements climatiques.

D. Analyser, comprendre, modéliser, prédire : produire les connaissances pour la maîtrise des ressources algues et agrosourcées présentes et futures

1. Algues et plantes : sources d'inspiration pour des solutions durables et innovantes

À la base de tous les systèmes alimentaires les organismes photosynthétiques sont au cœur de la question de la sécurité alimentaire. En amont d'études souvent menées de façon coordonnée avec l'INRA, une meilleure compréhension de leur biologie est nécessaire pour sécuriser la production face à l'augmentation des risques climatiques tout en diminuant l'impact environnemental et sanitaire de l'agriculture. L'ensemble des travaux menés sur la biologie des plantes, en lien avec l'environnement, trouve naturellement ici un champ de valorisations mutuelles, car certaines questions posées sur les pratiques agricoles inspirent des questionnements très fondamentaux. De nombreuses thématiques concernant par exemple le métabolisme carboné peuvent inspirer des stratégies pour améliorer la valeur nutritionnelle des productions végétales. Le CNRS est impliqué dans ce dialogue entre recherche fondamentale et appliquée, et celui-ci devra bien entendu être poursuivi, mêlant continuité et innovation.

Les algues et les plantes sont par ailleurs de fantastiques usines vivantes qui produisent à partir de l'énergie du soleil une grande variété de molécules, que les autres organismes ne peuvent produire. Certaines sont exploitées depuis longtemps pour élaborer des matériaux (bois, papier, coton) ou fournir de l'énergie. Leur potentiel reste cependant sous-exploité et devrait donner lieu à des applications par exemple en chimie (chimie verte et bleue), et dans le domaine de l'énergie (biocarburant, bioinspiration pour la photosynthèse artificielle, génération d'hydrogène). Ces thémati-

ques constituent un enjeu autant économique qu'environnemental et nécessitent un investissement important en biologie des organismes photosynthétiques. Les partenaires du CNRS dans ce domaine sont multiples, dont le CEA, l'INRA et l'IFREMER.

Les macro-algues constituent une source d'alimentation humaine en Asie mais leur développement en Occident est plutôt envisagé en tant qu'aliments fonctionnels ou pour l'apports de protéines. La diversité chimique originale de leurs composants pariétaux, en particulier les polysaccharides et les composés phénoliques, permet déjà d'envisager des applications dans le domaine des nouveaux biomatériaux, résines et adhésifs pour développer des substituants aux produits de la pétrochimie ou pour des applications biomédicales. Comme pour les micro-algues, la problématique de la valorisation et de l'exploitation industrielle des macro-algues est étroitement corrélée à l'accès à la biomasse et donc au développement de systèmes de culture en mer ou à terre. Pour le moment les systèmes de production en France et en Europe sont peu performants et leur amélioration passera par le déploiement d'ambitieux programmes de sélection variétale. Il s'agit d'un domaine scientifique en pleine évolution où de nombreux verrous sont à lever, tels que le développement d'outils et de ressources génétiques et la maîtrise des cycles de vie.

Il est également indispensable de développer, maintenir et protéger des collections de souches d'algues (vivantes ou cryo-préservées) issues de la diversité naturelle ou de programmes de sélection variétale. La communauté de la recherche française occupe une position de leader international dans ce secteur qui devient très compétitif.

2. Métabolisme carboné : une diversité moléculaire à explorer et comprendre

Les organismes photosynthétiques synthétisent la plus importante diversité connue de polysaccharides, lipides et autres métabolites primaires, dont certains sont de très haute

valeur pour les applications listées précédemment. La maîtrise de la quantité et de la diversité de ces métabolites nécessite la compréhension fine de leur synthèse, de leur dynamique de distribution et de leur rôle physiologique dans la cellule.

Une spécificité végétale examinée par plusieurs unités de la section est la formation d'une paroi pecto-cellulosique, apposée à la membrane plasmique, en relation avec un ensemble de structures lipidiques (cuticule, vésicules, gouttelettes) dont l'hétérogénéité va de pair avec la variété des fonctions biologiques effectuées. Certaines algues ont une paroi minéralisée, silicifiée, calcifiée. Ces barrières d'échanges hébergent des récepteurs de signaux chimiques et mécaniques, et façonnent des complexes réactionnels en microdomaines dont la spécificité fonctionnelle reste mal connue.

Plusieurs unités de la section 23 sont aussi leaders internationaux dans l'étude des lipides, leur diversité chimique (acyl lipides, dérivés d'acides gras, alcanes, alcènes, stérols, etc.), leurs propriétés biophysiques, leurs interactions avec d'autres lipides et protéines avoisinantes, permettant de comprendre comment leurs flux participent à la régulation de multiples fonctions biologiques essentielles comme la biogenèse des compartiments membranaires, la polarité cellulaire, le trafic vésiculaire et l'autophagie. Les enzymes de synthèse et de modification des lipides sont bien connues chez les plantes au contraire du trafic lipidique ou des systèmes de tri, défi pour l'avenir. Concernant les algues, le socle de connaissances est faible. Les micro-algues ont une forte capacité à synthétiser les acides gras et à les accumuler sous forme de réserves en huile, ce qui a ouvert un champ important de recherche. Il est enfin à noter une montée en puissance dans plusieurs unités de la section 23 de travaux sur les glycérolipides, stimulés d'une part par l'exploitation des huiles composées de triglycérides, pour des applications biotechnologiques, et d'autre part du fait du rôle majeur des phosphoinositides dans les processus cellulaires du développement.

En ce qui concerne la qualité nutritionnelle des graines et des fruits, il est nécessaire de

mieux comprendre la régulation et la distribution des flux entre voies métaboliques. Dans le cadre du métabolisme de l'amidon et de sa régulation, plusieurs points primordiaux restent à éclaircir, tels que les mécanismes liés à l'initiation de la formation du grain d'amidon puis le contrôle génétique de leur nombre et de leur taille. Une meilleure connaissance des mécanismes précis de formation de l'amylopectine est un préalable indispensable à une modification raisonnée et contrôlée de sa structure *in planta* en vue des différentes applications industrielles potentielles.

Les métabolites secondaires (spécialisés) sont des molécules présentant une diversité moléculaire encore plus grande (composés phénoliques, terpènes, alcaloïdes, oxylipines, etc.) à large spectre fonctionnel, qui exercent une action déterminante sur l'adaptation incessante des organismes photosynthétiques à leur environnement. Ils interviennent dans la communication, la signalisation, la défense, la réponse aux stress, etc, et ont également une valeur inestimable pour l'homme par leurs propriétés nutritionnelles, pharmaceutiques ou industrielles. Leur identification est loin d'être complète alors qu'ils impactent entre autres la santé des consommateurs. Une meilleure connaissance des plantes et des algues dans leur diversité et des enzymes à l'œuvre dans leurs voies métaboliques est à la base de la transition vers une bio-économie dépendant moins des ressources actuellement utilisées. La production de métabolites spécialisés d'intérêt économique nécessite donc de compléter les approches actuelles par des connaissances spatiotemporelles de leurs voies de synthèse.

Au-delà de l'intérêt accru pour certaines branches du métabolisme primaire et/ou secondaire, une avancée récente revitalise l'ensemble des études des voies de biosynthèse. Il s'agit de la mise en évidence de l'assemblage transitoire de protéines, dont des enzymes, et de constituants membranaires pour canaliser ces synthèses, optimisant les réactions qui se succèdent entre un métabolite initial et un produit final. Ces 'métabolons' ont une architecture dynamique et contrôlent la biodiversité des métabolites produits. Il s'agit sans aucun

doute d'un virage conceptuel qui devrait conduire à une mutation des stratégies biochimiques, permettant de mieux structurer l'articulation de la métabolomique dans les études intégratives et multi-échelles.

3. Importance stratégique des ressources algo- et agrosourcées : nécessité d'instrumentations analytiques, de réseaux de recherches inter-organismes et de partenariats

Le développement de filières algo-et agrosourcées en France et en Europe est étroitement dépendant de l'élargissement du socle des connaissances et de l'amélioration du flux des innovations sur les plantes et les algues et doit reposer sur des réseaux de recherche inter-organismes et des partenariats robustes. La production de données à grande échelle au travers des approches dites 'omiques' a considérablement impacté les activités de recherche de la biologie végétale comme de la biologie en général et est indissociable d'un accès facilité à des plateformes technologiques analytiques à moyen ou haut débit, performantes, innovantes et mutualisées. La métabolomique ou la biologie structurale sont de bonnes illustrations de l'importance capitale pour la communauté scientifique d'accéder à des équipements performants, à des compétences et de l'expertise scientifique et technologique de haut niveau ainsi qu'à de la formation afin de produire de la connaissance fondamentale et faire émerger des innovations de rupture.

Le paysage de la recherche française en biologie végétale a été considérablement transformé par les PIA (projets investissements d'avenir) qui ont structuré et établi des réseaux de R&D, des infrastructures nationales et des démonstrateurs. Les projets sélectionnés dans le cadre de l'action 'Biotechnologies-Bioressources' du PIA 1 ont permis de soutenir sur une durée de près de 10 ans, des consortia réunissant des partenaires académiques et privés afin de développer une agriculture durable, capable de s'adapter au changement climatique en sélectionnant de nouvelles varié-

tés de plantes cultivées aux performances améliorées : AKER (betterave), AMAIZING (maïs), BFF (sorgho, miscanthus, maïs), BREEDWHEAT (blé), PeaMUST (pois), RAPSODYN (colza), et SUNRISE (tournesol, à ne pas confondre avec l'initiative européenne SUNRISE mentionnée plus haut). Les projets IDEALG (macroalgues) et OCEANOMICS (plancton) ont conduit au développement d'outils et de ressources destinés à valoriser les ressources végétales marines de façon durable tout en veillant à respecter la biodiversité. Une inquiétude est aujourd'hui liée au devenir incertain de ces initiatives.

II. Recommandations pour renforcer le positionnement et la dynamique de la recherche nationale sur les organismes photosynthétiques

A. Thématiques et infrastructures nécessitant une vigilance dans un contexte budgétaire contraint

1. La crainte du déclassement

Unanimement, les DU ont exprimé la crainte de ne pouvoir maintenir des thématiques sur lesquelles leurs unités sont reconnues internationalement. Cette crainte est liée à la chute durable des recrutements par le CNRS et les autres tutelles, et au vieillissement des équipements. Personne ne met en doute qu'il soit nécessaire d'accompagner le décroissement de certaines activités, mais lorsque celles-ci sont en plein développement, avec une production scientifique de premier plan, l'absence conju-

guée de financements et la baisse brutale de recrutements créent un sentiment d'impuissance et de détresse. Cette crainte s'exprime aussi au niveau des infrastructures financées par les premières vagues du PIA. Il est important de signaler cette situation dans ce rapport.

2. Réussir à poursuivre l'approfondissement de thématiques matures et importantes sur des modèles d'organismes 'historiques' tout en abordant des thématiques nouvelles, inspirées par les découvertes et les ruptures

Il y a plusieurs décennies, les Sciences Naturelles dont l'étendue des curiosités était ouverte à l'ensemble du vivant, avaient dû 'laisser la place' au déchiffrement méthodique des mécanismes moléculaires fondamentaux du vivant sur quelques modèles d'études. Les progrès technologiques et méthodologiques récents guident de nouveau notre curiosité sur la biodiversité, avec cette fois-ci la nécessité, puisque cela est possible, d'en déchiffrer les mécanismes moléculaires et les architectures. Deux grands moteurs assez différents alimentent ce mouvement profond, d'une part le besoin de transférer les connaissances aux plantes cultivées, sur lesquelles il est maintenant possible de travailler 'sans passer' systématiquement par *Arabidopsis*, et d'autre part la prise de conscience que la majeure partie de la biodiversité des organismes photosynthétiques eucaryotes est encore méconnue. Ce dernier point correspond à un renouveau des Sciences Naturelles, mais avec des questions posées par des molécularistes et des biologistes cellulaires, dans le contexte de la crise environnementale qui requiert de disposer de telles connaissances. Les laboratoires français, grâce à leurs historiques, leurs cultures, leurs masses critiques, et grâce à l'excellence de leurs chercheurs, peuvent se positionner parmi les leaders internationaux sur tous ces champs thématiques, à condition de bien gérer la transition. En termes de périmètre scientifique, la section voit donc son assise évoluer pour embrasser plus globalement l'ensemble des organismes photosynthétiques, marins et terrestres (Annexe 2).

Comme rapporté plus haut, il reste primordial de poursuivre l'approfondissement des connaissances sur nos modèles les mieux connus, malgré la difficulté à les financer par les agences de financements focalisées sur les systèmes en rupture. Le CNRS devrait pouvoir jouer un rôle dans le soutien de ces thématiques traitées par plusieurs unités de l'INSB, qui ont réussi à atteindre un niveau très élevé dans la compréhension multi-échelle et intégrée de processus fondamentaux. Parmi les thématiques que les DU jugent important de maintenir et consolider, sans être exhaustifs on compte : la photosynthèse en lien avec le développement et le métabolisme ; le contrôle de l'expression des gènes aux niveaux génomique, épigénomique, transcriptionnel et post-transcriptionnel ; le développement des méristèmes en lien avec l'organogenèse de la racine, des organes végétatifs et de la fleur, la phytonutrition en lien avec le développement et les stress abiotiques ; le métabolisme carboné en lien avec les métabolismes énergétiques et les interactions biotiques et abiotiques. À ceci s'ajoutent les études des relations symbiotiques et des relations hôtes-pathogènes sur différents systèmes modèles. Enfin, plusieurs unités de l'INSB ont été parmi les premières à identifier des organismes d'études, que l'on peut considérer comme émergents, en particulier de micro- et de macro-algues, à en caractériser les cycles de vie, en séquencer les génomes, y développer des outils moléculaires. Un point de vigilance concerne les thématiques liées aux interactions entre organismes photosynthétiques et virus, malgré les rôles que ces derniers jouent sur la biologie et l'évolution de leurs hôtes. Les études multi-échelles et intégratives listées ici forment un socle de connaissances critique pour aborder les nouveaux modèles d'études. Une vigilance particulière de l'INSB est donc sollicitée sur la pérennité de ces sujets.

Les années récentes ont été marquées par une certaine naïveté à transférer des schémas métaboliques ou des réseaux de régulations déchiffrés sur quelques organismes modèles à tout végétal au génome séquencé et annoté. Certains DU soulignent le besoin de poursuivre l'annotation des génomes, voire de réviser de façon profonde certaines annotations erro-

nées, qui forment toutefois le socle d'études futures. Indépendamment de ce besoin de disposer de données fiables sur les organismes de référence, il est clair par ailleurs qu'on ne peut faire l'économie d'expérimentations, par voie de génomique fonctionnelle, mais aussi de biochimie, électrophysiologie, physiologie, etc, pour avancer sur l'analyse des nouveaux modèles d'organismes. À l'instar de ce qui est mentionné plus haut sur un 'retour' aux Sciences Naturelles par des biologistes moléculaires intrigués par des données de génomique comparative, trois disciplines sont remobilisées pour mener ces études : la biologie cellulaire, la biochimie, et la génétique. Un exemple illustrant que la génomique comparative ne peut suffire est celui de l'étude de la photosynthèse et des mécanismes de régulation par la lumière chez les diatomées qui suffit à montrer qu'il existe des mécanismes fondamentaux très divergents, qui peuvent remettre en cause certains postulats établis sur la lignée verte. Les unités de l'INSB permettent de rassembler ces pionniers des nouveaux modèles au plus près des biologistes étudiant les organismes classiques, et cet assemblage devrait être maintenu, car c'est une force, reconnue internationalement pour avancer avec un bénéfice mutuel.

3. Poursuivre la consolidation et l'ouverture des plateformes analytiques, des infrastructures partagées et des services d'analyse des données

La qualité des travaux menés par les unités relevant de la section 23 repose sur des approches intégratives multi-omiques et des analyses multi-échelles. Ce rapport réaffirme ce besoin, et souligne que de nombreuses études initiées en particulier par de jeunes chercheurs, CRCN récemment recrutés, reposent sur de telles études qu'il semble très souvent impossible à financer. Il n'est pas rare de voir la première année des CRCN recrutés consommée par la recherche de financements. Des données de base peuvent être utiles à tous les chercheurs, juniors et seniors, pour répondre aux appels à projets. Comment financer le séquençage de quelques génomes, l'évaluation d'un profil de

marques épigénétiques sur un nombre décent d'échantillons, l'analyse de profils transcriptomiques, l'aide d'un service permettant d'annoter ou d'analyser ces résultats par des méthodes 'classiques' de bioinformatique, ou encore le développement de quelques anticorps? Les méthodes de séquençage progressent (Pac Bio, nanopore) permettant un accès toujours plus rapide et précis aux données génomiques. Ces données, bien que critiques dans le contexte de la concurrence internationale, sont difficiles à obtenir au quotidien dans un laboratoire, et chronophages à analyser quand le temps des chercheurs est absorbé par des activités rédactionnelles. Une possibilité serait dans la mesure du possible de développer un fonds spécifique permettant de financer de telles études, sur une base régulière.

B. Enjeux d'avenir, thématiques et technologies émergentes

1. Accompagner la révolution de l'édition génomique dans toutes ses dimensions et développer les approches de biologie synthétique

L'ingénierie moléculaire permettant d'explorer fonctionnellement les organismes photosynthétiques, est entrée dans une 'ère des possibles', grâce aux évolutions technologiques en particulier des méthodes d'édition. Il est indispensable de soutenir et démocratiser les recherches sur, et exploitant, le système CRISPR/Cas9, pour l'édition des (épi)génomés ainsi que pour le développement de sondes moléculaires. Le développement de systèmes agiles pour l'ingénierie génétique des procaryotes et eucaryotes, permettant l'expression multicistronique eucaryote (e.g. le système 2A), et/ou l'expression de gènes synthétiques, ouvre en grand la créativité à la fois pour la biologie fondamentale et pour la recherche appliquée (dont les thématiques reposant sur la biologie synthétique, développées par plusieurs unités de la section 23). La mise en place de ressources, idéalement libres d'accès, de

vecteurs conçus pour les végétaux (algues et plantes) par les chercheurs du CNRS, ou l'accès à des plateformes robotisées de biologie moléculaire, sont des pistes possibles, qui pourraient avoir une ambition proche de celle qui avait motivé la mise en place des collections de mutants il y a deux décennies. Il serait de même important de promouvoir la mise en place de workshops et de réseaux sur ces méthodologies en progrès permanent. Cet effort pourrait être mené avec d'autres tutelles.

2. Pousser les limites analytiques et coupler ces méthodes avec l'imagerie

Les plateformes analytiques ont engagé une structuration à l'échelle nationale. Il faut poursuivre cet effort, en incluant dans le schéma de développement le besoin d'analyser le plus grand nombre d'échantillons, en particulier végétaux, avec une plus grande sensibilité. Un objectif intéressant est de promouvoir une convergence avec les méthodologies d'analyse de la cellule unique (voir ci-dessous). Concernant les organismes photosynthétiques, les plateaux et plateformes doivent permettre l'analyse de molécules absentes des cellules animales (la majorité des plateformes n'ont pas les standards correspondant aux métabolites majeurs de végétaux) et en appréhender la diversité moléculaire. Il faut donc par exemple associer spectrométrie de masse pour les résolutions structurales, chimiques, avec les méthodes couplant chromatographie liquide et spectrométrie de masse en tandem pour le profilage systématique de métabolites. Il est aussi important d'avancer dans l'étude de la diversité des modifications post-traductionnelles du protéome, en particulier le phosphoprotéome, le N-terminome, l'inventaire des protéines ubiquitinées. L'approfondissement de notre connaissance sur les modifications des histones est à considérer avec l'ensemble des modifications des nucléotides. Le couplage avec l'imagerie à haute-résolution doit se poursuivre et se populariser, pour aborder les questions de flux d'ions, de métabolites, d'hormones ou de nucléotides aux échelles cellulaires.

3. Analyser l'architecture et la dynamique des assemblages protéines-protéines, protéines et ADN, ARN, lipides, pigments, métabolites, hormones et tout autre ligand (complexes, machines moléculaires, métabolons, nanodomains)

Un enjeu du déchiffrement des mécanismes moléculaires, suivant les approches déterministes, est de comprendre l'élaboration d'assemblages transitoires de protéines, lipides, ADN, ARN, etc, et la dynamique de ces assemblages. Plusieurs processus dynamiques cellulaires (biologie des polynucléotides, cytosquelette, trafic vésiculaire, processus biogénétiques) nécessitent la dissection de machines moléculaires, de métabolons, de nanodomains fonctionnels, autant d'associations transitoires et labiles. Il est essentiel de soutenir la dissection biochimique de complexes mixtes entre protéines et autres ligands, et de développer les méthodes permettant une compréhension *in situ* de ces associations. Dans le même esprit, les méthodes de séparations d'organites de façon très résolutive, tels que des noyaux étiquetés pour leur appartenance à un type cellulaire par la méthode INTACT, seront sources d'information plus fines et déterminantes. Il semble pertinent de soutenir les approches biophysiques (RMN, microscopie force atomique, spectrométrie des neutrons, rayons X, etc.) et la modélisation moléculaire et dynamique des systèmes. L'intégration de l'ensemble à l'échelle cellulaire, ce qui demande le développement et l'application de nouveaux modèles mathématiques, est un enjeu clair pour certaines thématiques, dont la mécanobiologie, particulièrement importante pour le développement des organismes photosynthétiques.

4. Développer l'imagerie de la cellule unique à l'organisme pluricellulaire

L'imagerie est une clé pour comprendre le lien entre les assemblages dynamiques de protéines et macromolécules et leur(s) fonction(s) au niveau d'organisation supérieur, pour des questions aussi diverses que la différenciation cellulaire, la biogénèse de compartimentations

subcellulaires complexes chez les endosymbiontes secondaires, les processus infectieux, les coopérations entre organites par des contacts intermembranaires, ou encore la formation de complexes entre protéines et d'autres molécules, de nanodomains à la membrane plasmique, etc. Les avancées futures, sources de découvertes, dépendront de l'accès aux technologies nouvelles d'imagerie, permettant la visualisation dynamique de molécules uniques, l'organisation tridimensionnelle de cellules par tomographie électronique (par exemple par microscopie électronique à balayage à faisceau d'ions focalisé), la corrélation entre détection de sondes fluorescentes et microscopie électronique, etc. Les techniques de tri cellulaire sont associées à ces approches générales, ainsi que la microfluidique pour poser les questions relatives aux types cellulaires isolés. La microscopie en feuillet de lumière peut permettre le lien à l'échelle pluricellulaire. Enfin, la possibilité de suivre les phénotypes dans le temps à ce niveau de résolution (approches dites '4D') permettront de pousser les frontières des connaissances à un niveau structural et fonctionnel inégalé.

5. Développer les systèmes expérimentaux multi-organismes pour les études de relations avec l'environnement abiotique et biotique

L'articulation entre l'organisme et son environnement passe aujourd'hui par l'élaboration de systèmes expérimentaux permettant d'appréhender les relations intra- et interspécifiques, dans des environnements aux variables maîtrisées. Les 'standardized fabricated ecosystems' ou EcoFAB sont peu développés en France, alors qu'ils représentent un enjeu d'échelle international pour l'étude des microbiotes associés, et d'une façon plus large, des holobiontes. Il sera donc pertinent de soutenir le développement d'écosystèmes expérimentaux pour toutes les thématiques relevant de l'interface avec l'environnement, l'étude de contraintes multiples, multistress, etc. En corollaire, il est essentiel de pouvoir mesurer de façon automatisée, fiable et au plus haut débit possible le phénotype des

végétaux. En interface avec la section 29/INEE, les études articulant écophysiologie, expérimentations et observations dans les Ecotrons, Zones Ateliers, Friches Industrielles et Jardins Expérimentaux seront à encourager.

C. Orientations stratégiques propices à dynamiser la recherche sur les organismes photosynthétiques

Plusieurs enjeux fondamentaux motivent les recherches menées dans la section 23. Sur le front des connaissances, le déchiffrement des mécanismes fondamentaux du vivant, par des approches multi-échelles et multi-omiques peuvent atteindre des niveaux inégalés sur les modèles d'organismes les mieux connus. La biodiversité peut enfin être explorée avec les outils moléculaires, pour aborder la question de l'évolution des organisations fonctionnelles. Du fait que les organismes photosynthétiques représentent les deux tiers de la biodiversité, ils sont aussi la *Terra incognita* la plus vaste. Au-delà d'éveiller notre curiosité pour avancer au front des connaissances, les organismes photosynthétiques sont aussi au cœur de la crise environnementale et la part du Vivant sur laquelle se concentrer pour poser les questions de la sécurité alimentaire, des innovations biotechnologiques et du développement de bioénergies durables.

Dans ce contexte, les pistes suivantes sont à considérer pour soutenir les orientations stratégiques futures :

- favoriser des programmes visant à combler nos déficits de connaissances dans le domaine du vivant photosynthétique ;
- promouvoir les recherches à différents niveaux d'organisation, du moléculaire à la biosphère, intégrant plusieurs disciplines ;
- promouvoir les interactions avec la physique, la biophysique, la biologie structurale (section 20), les sciences de l'évolution et l'écologie (section 29), les mathématiques, etc. ;

– articuler recherche guidée par la curiosité avec recherche guidée par les avancées technologiques, qui peuvent faire naître des approches créatives et sources de ruptures ;

– renforcer la coordination des recherches sur les organismes photosynthétiques avec en particulier l'INRAE, le CEA, l'IRD, le CIRAD, l'IFREMER, L'INRIA et les Universités.

Dans le cas des universités, il sera important de promouvoir l'enseignement spécifique de la biologie végétale, car le CNRS est un des seuls organismes qui dispose d'une vision nationale de cette ampleur quand les universités peuvent céder à la tentation de se spécialiser au détriment de certaines disciplines fondamentales. L'initiative de soutenir le financement de thèses dans le cadre du programme 80prime a été menée avec un certain niveau d'impréparation. Il serait utile si cette opération devait être pérennisée d'identifier des thématiques, avec une réflexion suffisamment mûrie, pour identifier et soutenir des secteurs stratégiques, parce qu'ils sont importants dans la durée, comme action de recherche rayonnante du CNRS, et/ou parce qu'ils sont porteurs d'innovation en soutien à l'émergence, à la rupture, à la découverte. Un équilibre entre les deux devrait être recherché.

Par l'enjeu sociétal, l'articulation amont-aval doit impliquer le CNRS, qui semble parfois moins moteur que l'INRA ou le CEA, alors que de nombreuses applications sont issues de travaux de ses chercheurs. Il est donc essentiel d'affirmer la volonté d'articuler recherches fondamentales, finalisées et appliquées, en s'appuyant sur un système transparent, cohérent et décent de financement de la recherche nationale.

Il semble, sur ces deux derniers points, important de consolider et développer la place de la recherche menée au CNRS sur les organismes photosynthétiques, et les organismes qui leurs sont intimement associés, aux interfaces de la formation (côté université) et du transfert vers les acteurs industriels (avec les autres tutelles disposant déjà d'accords-cadres avec des acteurs majeurs de l'industrie). Il s'agira certainement d'une question pour l'avenir, à mener en considérant l'élargissement du socle thématique de la section 23, à l'ensemble des organismes photosynthétiques marins et terrestres, organismes modèles et non-modèles, pertinents pour poser les questions depuis l'élucidation de mécanismes fondamentaux inconnus du vivant, à l'impact de la crise environnementale sur le socle des écosystèmes et l'exploration du potentiel de ces organismes pour l'agriculture, l'agroécologie, les chimies vertes et bleues et les bioénergies.

ANNEXE 1

ANR : Agence nationale de la recherche

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

DU : Directeur d'unité

ERC : European Research Council

GDR : Groupement de Recherche

GIS : Groupement d'intérêt scientifique

GWA : Genome Wide Association

IBiSA : Infrastructures en Biologie Santé et Agronomie

IFREMER : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

INRA : Institut national de la recherche agronomique

INRAE : Institut national de la recherche en agriculture, alimentation et environnement

INRIA : Institut national de recherche en informatique et en automatique

IRD : Institut de recherche pour le développement

IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

PIA : Programme Investissement d'Avenir

RMN : Résonance magnétique nucléaire

UMR : Unité mixte de recherche

ANNEXE 2

Remarque sur la méthodologie pour la préparation de ce rapport : ce chapitre a été rédigé après consultation des directeurs d'unités (DU) et des directeurs de groupements de recherche, relevant de la section 23 en section principale. Vingt-deux DU et responsables de structures ont précisé leurs modèles d'études et thématiques

les plus fortes dans leurs unités, qui contribuent du rayonnement national en recherche fondamentale sur les organismes photosynthétiques. Les DU ont aussi partagé leurs visions sur les thématiques et technologies émergentes à développer et consolider.

1. Modèles d'étude utilisés par les unités de la section 23



Établi à l'aide de 207 mots-clés issus des unités, ce nuage de mot illustre la force de la recherche nationale menée sur le modèle de plante *Arabidopsis* et la croissance récente des recherches menées sur les algues. Il apparaît donc que la section est unifiée par l'étude des algues et des plantes, de façon équilibrée.

SECTION 24

PHYSIOLOGIE, VIEILLISSEMENT, TUMORIGÈNESE

Composition de la section

Marc BILLAUD (président de section), Julie GAVARD (secrétaire scientifique), Maria-Clotilde ALVES-GUERRA, Oliver BISCHOF, Jean-Paul BORG, Catherine BRENNER, Anne CANTEREAU, Joëlle COHEN-TANNOUDJI, Jean-Luc COLLOMB, Valérie CORONAS, Olivier CUVILLIER, Bérengère FROMY, Amandine GAUTIER-STEIN, Malika HEMERY, Emmanuelle HUILLARD, Philippe JUIN, Alain LACAMPAGNE, Véronique MAGUER-SATTA, Arnaud MONTEIL, Carole PEYSSONNAUX, Richard TOMASINI.

Résumé

La description des mécanismes régulant les grandes fonctions physiologiques ainsi que l'étude de leurs perturbations au cours du vieillissement et de la tumorigénèse sont au centre des investigations conduites par les scientifiques relevant de la section 24. Derrière la diversité des processus biologiques étudiés, ces recherches ont révélé la communauté des voies de signalisation et des mécanismes physiopathologiques impliqués. Ces travaux ont une dimension fondamentale et constituent aussi un enjeu majeur en santé publique puisque les maladies non transmissibles représentent la principale cause de décès dans le monde. La section rassemble les expertises complémentaires permettant de traiter ces différents champs disciplinaires, non pas comme

des secteurs séparés, mais de manière intégrée. Dans le contexte actuel de la recherche publique en France, les membres de la section adhèrent aux propositions pour la recherche élaborées par le Comité National en 2019.

Introduction

La section 24 rassemble des scientifiques travaillant dans les domaines de la physiologie, du vieillissement et de la tumorigénèse. Leurs recherches se caractérisent, avant tout, par une vision intégrative des processus biologiques. Ceux-ci sont aujourd'hui conçus en termes

d'échafaudage de complexes moléculaires, de formation de structures tissulaires insérées dans leur micro-environnement et de systèmes de communication coordonnant le fonctionnement des cellules et de l'organe au sein de l'organisme.

Quoique les thématiques de la section puissent apparaître hétérogènes, elles se caractérisent, en fait, par une homogénéité sous-jacente, identifiable à plusieurs niveaux : i) une communauté des approches expérimentales multi-échelles et des modèles utilisés ; ii) une similarité dans les mécanismes physiologiques et physiopathologiques décrits ; iii) une volonté partagée d'être transdisciplinaire et intégratif dans la construction des programmes de recherche.

Ainsi, en physiologie, les mécanismes régulant l'homéostasie sont aujourd'hui étudiés dans toute l'étendue de leurs dimensions spatio-temporelles. Au niveau spatial, les recherches visent à caractériser les multiples modes de dialogue interorganites et interorganes et à établir comment ces interactions concourent à la stabilisation des entités biologiques dans un système hiérarchique allant des organites cellulaires jusqu'à l'organisme. Les régulations endocrines et nerveuses gouvernent toutes les fonctions physiologiques et sont, à ce titre, des éléments clés du contrôle de l'homéostasie. Un autre domaine de recherche, en plein essor, est celui concernant les interconnexions entre métabolisme, nutrition et microbiote intestinal. Au niveau temporel, la chronologie du renouvellement des tissus à partir des cellules souches est primordiale au cours de l'histogenèse et fait l'objet de nombreuses études, tout comme l'élucidation des bases moléculaires et cellulaires de la rythmicité des processus biologiques dans le règne animal.

L'étude du vieillissement et de la tumorigenèse est abordée aujourd'hui avec la même logique intégrative. Il ne s'agit plus de séparer les phénomènes pour les décomposer en un ensemble statique de composants moléculaires mais de les analyser dans la complexité dynamique de leurs interactions et de concevoir des modèles expérimentaux *ad hoc* permettant de

simuler ces processus afin de les modéliser. Les mécanismes du vieillissement ne peuvent plus se comprendre si on les dissocie de questions liées à l'érosion des compartiments de cellules souches, aux altérations des systèmes de régulation, au contrôle systémique du métabolisme énergétique, à l'impact de la nutrition et du microbiote. De la même manière, la tumeur ne peut plus être considérée comme une masse amorphe de cellules en division mais doit être conçue comme un « pseudo-organe » avec ses propres règles d'organisation et de fonctionnement.

Si nous entrons dans l'ère de l'*integron* décrite par François Jacob, néologisme par lequel il désignait ce système d'emboîtement dynamique des différents niveaux d'organisation de la cellule qui caractérise le vivant, la section est idéalement placée pour accompagner la construction de ces nouveaux savoirs.

I. Décoder les mécanismes physiologiques

A. Dialogues interorganites et interorganes

1. Les dialogues interorganites

Considérés à l'origine comme des éléments compartimentés et autonomes, spécialisés dans des fonctions définies au sein de la cellule, les organites sont des structures dynamiques dont les interconnexions influencent leurs fonctions et leur permettent d'agir de manière coopérative, voire synergique. Ce dialogue repose sur des sites de contacts membranaires qui constituent des carrefours de signalisation et de voies métaboliques en permettant l'échange d'ions, de métabolites et de protéines. Par l'intermédiaire de ces contacts membranaires, le réticulum endoplasmique

module les fonctions majeures de la mitochondrie et la maturation des endosomes/lysosomes, notamment par l'intermédiaire des flux calciques. Plusieurs protéines structurales des sites de contact ont été identifiées mais les mécanismes moléculaires précis mis en jeu restent à élucider. Un autre niveau de complexité implique les ribosomes dont des travaux récents ont révélé l'hétérogénéité dans leur composition moléculaire au niveau intracellulaire ainsi que d'un type cellulaire à l'autre, hétérogénéité qui conditionne leur capacité traductive. La question de leur rôle dans la régulation des interactions entre organites et dans la différenciation cellulaire est un sujet actuel d'investigation. Les modalités de dialogue entre organites sont dépendantes du type cellulaire considéré et sensibles à l'environnement extérieur de la cellule. Ces dialogues apparaissent ainsi essentiels à l'établissement d'une réponse physiologique adaptée et spécifique. Au delà de l'aspect purement fondamental, des altérations de ce dialogue ont été décrites en contexte pathologique dans des processus de neuro-dégénérescence, de tumorigénèse, de diabète ainsi que dans des pathologies rénales et cardio-vasculaires.

2. Les dialogues interorganes

Au concept de glandes endocrines, régulant chacun de grandes fonctions par l'intermédiaire d'hormones circulantes spécifiques, se superpose aujourd'hui un modèle de régulation plus complexe. La physiologie de l'organisme résulte en effet de l'intégration de nombreux signaux informatifs émanant de multiples sites de production endogènes et de l'environnement. La liste des peptides circulants (et de leurs tissus producteurs) jouant un rôle régulateur sur l'homéostasie métabolique, cellulaire ou immunitaire n'a cessé d'être complétée par les études fondamentales et épidémiologiques récentes. Modifiés par les conditions développementales, nutritionnelles ou pathologiques, ces signaux reflètent l'équilibre physiologique de chaque tissu. À ces informations tissulaires, s'ajoutent les signaux inflammatoires ou issus de l'alimentation et du microbiote, qui peuvent

transiter par voie circulante ou nerveuse. Ils constituent, par ailleurs, des facteurs clés dans les processus de développement, de vieillissement ou de régénération. La capacité d'intégration de ces signaux par l'organisme, notamment par le cerveau, est un élément essentiel dans la coordination des fonctions physiologiques et dans l'adaptation aux conditions environnementales.

L'enjeu, aujourd'hui, est de mieux comprendre les bases moléculaires de ce dialogue et de sa plasticité, aux étapes clés du développement, de la vie reproductive ou selon l'état métabolique. L'identification des différents réseaux neuronaux permettant l'intégration dynamique de ces signaux circulants et nerveux sera un élément essentiel pour la compréhension des réponses adaptatives. Une meilleure compréhension des dialogues interorganes ouvrira de nouvelles pistes thérapeutiques où l'organe cible d'une pathologie donnée ne sera probablement pas la seule cible thérapeutique à atteindre.

Ces modes de communication inter et intraorganes illustrent la complexité de l'intégration des signaux, qu'elle soit réalisée à l'échelle cellulaire, tissulaire ou au niveau de l'organisme entier. Cette intégration est un élément clé dans la variation des réponses à un signal donné.

Questions prioritaires :

– Déterminer comment les différents dialogues intra et interorganes s'intègrent et se hiérarchisent pour contrôler un processus biologique donné.

– Identifier comment l'intégration de ces signaux participe à la construction des réponses adaptées à l'environnement.

B. Homéostasie ionique

Le fonctionnement des canaux ioniques est un élément majeur du dialogue interorganite et intercellulaire au sein d'un organe. La régulation et la coordination des flux ioniques font

Intervenir plusieurs types d'acteurs moléculaires dont les canaux ioniques, les échangeurs, les transporteurs, ainsi que des récepteurs couplés aux protéines G ou à des tyrosines kinases. Ces protéines participent au fonctionnement des cellules excitables (neurones, cellules endocrines/neuro-endocrines, cellules musculaires, etc.) mais sont également des composantes essentielles des cellules non-excitables (fibroblastes, hépatocytes, cellules immunitaires, etc.). Outre les anomalies fonctionnelles de ces protéines retrouvées dans des cellules excitables en contexte pathologique (diabète de type 2, arythmies cardiaques, dystrophies...), des modulations d'expression des protéines impliquées dans l'homéostasie ionique sont aussi présentes dans les cellules tumorales. L'expression de transporteurs et d'échangeurs aboutissant à l'extrusion de protons des cellules tumorales et donc à l'acidification du microenvironnement tumoral joue également un rôle majeur dans la formation des métastases et l'échappement au système immunitaire. Dans ce contexte, il est primordial de comprendre les mécanismes régulant l'homéostasie ionique et ses dysfonctionnements.

Questions prioritaires :

– **Approfondir les techniques de mesure des flux ioniques en temps réel, notamment pour l'étude des dialogues interorganites.**

– **Déterminer comment la composition ionique de l'environnement tumoral participe à la tumorigenèse et aux mécanismes de résistance aux thérapies.**

C. Rythmicité des processus biologiques

La rythmicité des processus biologiques est nécessaire à l'organisme pour coordonner et ajuster son fonctionnement (du tissu aux cellules) aux changements environnementaux. Dans chaque cellule, le système régissant l'horloge interne dépend de boucles de rétroaction

transcriptionnelle et post-traductionnelle interconnectées. Ces boucles assurent la rythmicité et la synchronisation de l'expression génique et des processus métaboliques (principalement anaboliques et cataboliques). Régulée par le cycle nyctéméral, l'horloge interne située dans le noyau suprachiasmatique synchronise les oscillateurs périphériques, permettant l'adaptation de l'organisme aux rythmes de son environnement. La prise en compte de ces interrelations, des mécanismes de rétroaction et la caractérisation de leurs différents niveaux d'intégration sont nécessaires pour décrypter les liens existants entre altération/désynchronisation des rythmes (favorisée par les modes de vie actuels) et les pathologies endocrines, neurodégénératives, cardiovasculaires et tumorales. De telles connaissances devraient permettre également de déterminer les facteurs responsables de l'altération de l'horloge au cours du vieillissement mais aussi des conditions de vie dans nos sociétés contemporaines (travail de nuit, réduction de la durée du sommeil) et d'améliorer l'efficacité de certaines thérapies.

Questions prioritaires :

– **Approfondir nos connaissances sur les mécanismes utilisés par la cellule et l'organisme pour adapter leurs rythmes biologiques à leurs environnements.**

– **Caractériser le rôle des dialogues intra et interorganes dans la synchronisation et le maintien des rythmes biologiques.**

D. Homéostasie du renouvellement des tissus et cellules souches

L'homéostasie tissulaire, qui résulte d'un équilibre entre le renouvellement, la migration et la mort cellulaire, est nécessaire à l'établissement du tissu au cours de son développement et à son maintien chez l'adulte. Le renouvelle-

ment tissulaire (physiologique ou pathologique) nécessite un réservoir de cellules souches, qui persiste dans la plupart des tissus de l'adulte, à côté de cellules différenciées et fonctionnelles. Localisées dans des microenvironnements spécifiques, les cellules souches sont quiescentes mais peuvent être activées pour s'auto-renouveler. Ces capacités permettent leur maintien tout au long de la vie ainsi que la production continue de cellules qui vont entrer dans des processus de différenciation.

Les récentes avancées ont permis de décrypter certains des mécanismes impliqués dans la genèse et le maintien d'un état souche. À cet égard, l'avènement des cellules pluripotentes induites à partir de cellules différenciées (iPS « induced pluripotent stem cell »), a joué un rôle majeur dans la compréhension des processus impliqués dans la plasticité cellulaire. Générées en laboratoire, ces cellules ont permis d'accroître nos connaissances sur les mécanismes induisant la pluripotence et ceux régulant la différenciation cellulaire.

Un élément majeur du contrôle des cellules souches est son microenvironnement. Cette structure pluricellulaire, aussi appelée niche, joue un rôle essentiel dans le maintien de leurs fonctions. Parce qu'elles font partie d'un organisme, l'activité des cellules souches est influencée par la physiologie de l'organisme (hormones, rythme circadien, vieillissement, stress...). Ainsi, une altération des fonctions physiologiques de l'organisme peut affecter l'homéostasie tissulaire en agissant sur le compartiment des cellules souches. La compréhension des mécanismes régulant les cellules souches est donc cruciale, non seulement pour la connaissance des processus impliqués dans l'homéostasie tissulaire, mais aussi pour l'évaluation de l'impact biologique des perturbations environnementales ou internes.

Questions prioritaires :

– Décrypter l'hétérogénéité du compartiment souche et déchiffrer les mécanismes qui contrôlent la quiescence et l'activité des cellules souches.

– Déterminer l'impact fonctionnel du vieillissement intrinsèque (chronologique) ou extrinsèque (environnemental) sur ces cellules.

– Approfondir la connaissance des éléments du microenvironnement qui contrôlent l'activité des cellules souches.

E. Métabolisme cellulaire, différenciation et épigénétique

L'identité fonctionnelle de la cellule est fortement liée à son métabolisme. Les transitions métaboliques, comme par exemple le passage de la glycolyse à la phosphorylation oxydative, jouent un rôle critique dans le contrôle des processus de biosynthèse, de l'état redox de la cellule et de son statut épigénétique. Au delà de la synthèse d'ATP, ces modifications affectent la prolifération cellulaire, la différenciation, les activités enzymatiques et l'intégrité du génome. La réorientation du métabolisme intracellulaire est ainsi au centre des mécanismes de pluripotence, de spécialisation des cellules souches mais est aussi essentielle aux cellules somatiques pour adapter leurs fonctions aux modifications environnementales, comme lors d'un exercice physique ou de changements d'apport nutritionnel. Les modifications du métabolisme cellulaire se répercutent sur plusieurs boucles de régulation rendant les liens de causalité encore difficiles à établir. Le développement des analyses sur cellule unique sera un atout pour caractériser finement les mécanismes à l'origine des transitions métaboliques.

Le métabolisme intracellulaire fournit les substrats utilisés à la modification des acides nucléiques et de la chromatine qui régissent les processus de régulation génique. Ainsi, l'impact des informations métaboliques sur les mécanismes d'empreinte au cours de la gamétogenèse, de l'embryogenèse et de la période périnatale, ainsi que sur la physiologie de l'individu adulte constituent des pistes majeures de recherche.

Questions prioritaires :

– **Approfondir la connaissance des éléments du métabolisme et du microenvironnement qui contrôlent l'activité des cellules souches.**

– **Caractériser les mécanismes de transmission des modifications épigénétiques aux cellules filles et à la génération suivante.**

II. Vers une relecture des processus physiopathologiques

A. Polluants environnementaux : un défi pour notre futur

Les effets délétères dus à l'accumulation des polluants environnementaux résultant de l'activité anthropique sont l'un des aspects les plus préoccupants de la dégradation de l'environnement. Le cas d'un herbicide comme le glyphosate illustre la complexité des étapes nécessaires à la mise en place d'une réglementation protégeant la santé des populations exposées, complexité liée à des questions de niveau de preuve scientifique mais aussi à des enjeux industriels et politiques. Si les effets des polluants chez l'homme commencent à être connus ces dernières années, les conséquences sur l'ensemble du règne végétal et animal restent largement sous-explorées. L'un des défis que la communauté scientifique doit relever est le développement de nouveaux outils technologiques et de méthodologies transdisciplinaires pour évaluer efficacement les conséquences sur les processus physiologiques d'expositions chroniques à de faibles doses de molécules toxiques. Pour

cela la définition même de la toxicité de ces molécules sera à débattre à la lumière de nouvelles données biologiques d'exposition non plus de molécules individuelles mais de mélanges complexes pouvant présenter des effets antagonistes, additifs ou synergiques. Le défi est immense dans la mesure où le nombre de combinaisons est quasi infini et que les effets doivent être pris en compte à l'échelle de temps de la vie d'un individu afin de déterminer les fenêtres temporelles et/ou les contextes les plus à risques, ce que les scientifiques dénomment « exposome ». Cela nécessite de concevoir de nouvelles approches expérimentales pour modéliser et identifier les risques majeurs pour le vivant. À cet égard, les progrès de l'exposomique, de l'intelligence artificielle et du « data-learning » devraient aider à relever ce défi. La classification des perturbateurs endocriniens est également à revisiter pour les œstrogénomimétiques tels que les bisphénols. Il sera également primordial d'identifier les outils moléculaires et cellulaires les plus pertinents (épigénétique, « omics », etc.) pour identifier les biomarqueurs adaptés au suivi des populations. Enfin, il apparaît nécessaire que les sciences biologiques établissent des liens collaboratifs forts avec l'épidémiologie et les sciences humaines et sociales afin de mieux comprendre le déterminisme environnemental des pathologies chroniques.

Questions prioritaires :

– **Définir la toxicité de mélanges complexes de contaminants environnementaux. Identifier leurs impacts sur le développement physiologique.**

– **Déchiffrer comment l'intégration des signaux multifactoriels et cumulatifs participe à la perturbation des réponses physiologiques à l'échelle d'une vie.**

– **Déterminer si et comment les différents types de stress biologiques et psychologiques contribuent de façon conjointe au développement de pathologies.**

B. Le microbiote intestinal dans la nutrition et la santé

Notre corps est colonisé par des milliards de micro-organismes (bactéries, virus et champignons) dont la plus grande partie transite et réside dans notre tractus gastro-intestinal. Représentant un écosystème interne d'une diversité unique à chaque individu, ce microbiote est aujourd'hui considéré comme un organe « virtuel » de notre corps. Cette biomasse produit des milliers de molécules et métabolites ayant des effets locaux et systémiques affectant de nombreux aspects de la physiologie de l'individu. Son adaptation à nos modes de vie (comme les différences de composition du microbiote intestinal liées à la géographie, l'alimentation, les traitements médicamenteux tels que les antibiotiques mais aussi l'influence du macro-environnement dont les polluants), révèle notre interdépendance et notre coévolution. Le déséquilibre de son homéostasie (connu sous le nom de dysbiose) se traduit par une diversité microbienne réduite et / ou des modifications importantes d'espèces résidentes. Le microbiote et ses métabolites modulent notamment notre système immunitaire, et ont été corrélés à un large éventail de maladies incluant des pathologies inflammatoires, des troubles métaboliques comme l'obésité et le diabète de type 2, les maladies cardiovasculaires, le cancer, sans oublier ses effets sur la cognition.

Grâce aux progrès récents des approches métabolomiques et de séquençage à très haut débit, il est possible d'identifier tous les micro-organismes constituant le microbiote intestinal et plusieurs de leurs métabolites spécifiques. Associées à des outils bioinformatiques capables d'analyses multivariées sur de grandes quantités de données, ces approches permettent de mieux déchiffrer les profils microbiotiques globaux et spécifiques associés à diverses pathologies. Ainsi, la manipulation du microbiote par le contrôle de l'alimentation offre la perspective d'effets bénéfiques sur la santé, tant en termes de prévention, que d'approche thérapeutique personnalisée.

Questions prioritaires :

– *Analyser l'impact des interactions réciproques entre antibiotiques et microbiote.*

– *Caractériser à l'échelle d'un individu son microbiote pour contribuer à l'évaluation diagnostique, à la stratification du risque et à la décision thérapeutique.*

– *Comprendre à quel point le microbiote confère une susceptibilité à certains cancers et influe sur la réponse aux traitements.*

C. Nouvelles perspectives sur l'homéostasie immunitaire

Le système immunitaire a d'abord été défini comme un ensemble de mécanismes participant à la défense de l'organisme contre les agents pathogènes. La théorie du soi / non-soi a dominé l'immunologie en marquant la frontière entre les microbes infectieux et l'organisme (le soi). Plus récemment, il a été proposé que le système immunitaire n'est pas activé par le non-soi ou un danger, mais plutôt par un changement de normalité, appelée « discontinuité » : les variations quantitatives de ces changements déterminant l'amplitude de réponses effectrices. La notion de discontinuité englobe non seulement les microbes mais les polluants, les dommages de la matrice extracellulaire, les différents modes de mort cellulaire ou encore une augmentation de l'expression des protéines du soi. Cette théorie généralise la fonction de l'immunité au maintien de l'homéostasie, et non à une simple défense contre les agents pathogènes.

Le système immunitaire fait partie d'un organisme aux ressources limitées. Une mobilisation massive d'énergie est nécessaire pour une réponse efficace du système immunitaire. Ainsi, le système immunitaire dépend de la disponibilité de ressources stockées dans des cellules et des tissus spécialisés. De ce fait, des relations étroites existent entre méta-

bolisme et immunité dans un contexte physiopathologique, illustré dans différentes maladies systémiques comme l'obésité/ diabète, l'athérosclérose, le développement tumoral et les maladies infectieuses. L'inflammation des tissus métaboliques revêt un rôle primordial dans l'étiologie de ces maladies. Les macrophages ont longtemps été tenus comme seuls responsables de l'inflammation tissulaire mais un rôle important est maintenant attribué aux cellules de l'immunité adaptative et innée dans la pathogenèse de ces maladies. L'essor de l'immunothérapie anticancéreuse visant à cibler les inhibiteurs des lymphocytes T anti-tumoraux en est un exemple. Une meilleure connaissance des interrelations entre métabolisme et immunité est ainsi essentielle, tant au niveau fondamental qu'à celui du transfert vers les applications en santé.

Questions prioritaires :

– ***Mieux comprendre l'influence du système immunitaire sur le métabolisme des différents types cellulaires au sein du microenvironnement tissulaire physiologique et pathologique.***

– ***Déterminer inversement l'influence de la reprogrammation métabolique sur le système immunitaire.***

D. Le vieillissement : vers un rajeunissement de nos connaissances

Le vieillissement est la détérioration dans le temps des fonctions physiologiques nécessaires à la survie et à la fertilité, aboutissant à la mort de l'organisme. La vieillesse s'accompagne d'une augmentation de l'incidence de maladies chez l'homme qui sont rares chez les individus plus jeunes, notamment les maladies cardiovasculaires, neuro-dégénératives et le cancer. La cellule est la plus petite unité d'étude des mécanismes de vieillissement. Cependant, notre compréhension de la géné-

rique de ce processus provient en grande partie d'organismes modèles, protozoaires et invertébrés, même si la génétique murine est en train d'apporter une contribution majeure à ce champ de la recherche.

Des enzymes agissant dans plusieurs voies de détection des nutriments, telles que celles de l'insuline / facteur de croissance analogue à l'insuline, les protéines kinases mTOR, et AMPK ainsi que les sirtuines sont impliqués dans les mécanismes du vieillissement. Des essais cliniques sont en cours chez l'homme afin d'évaluer les effets de médicaments sur des processus biologiques associés au vieillissement. L'émergence d'une nouvelle classe de médicaments, les sénolytiques, a connu un développement rapide au cours des cinq dernières années. Ces derniers améliorent la fonction des tissus en éliminant les cellules sénescents qui induisent une inflammation chronique. À l'avenir, il sera nécessaire d'identifier l'ensemble des réseaux géniques dont l'expression accélère ou ralentit le vieillissement chez les vertébrés. Une étape cruciale sera de modéliser efficacement les « variants » génétiques identifiés, ainsi que d'autres facteurs associés au vieillissement. L'identification de biomarqueurs de vieillissement fiables fournissant des informations sur l'âge biologique sera également essentielle pour guider les approches pharmacologiques. Finalement, les modèles animaux émergents tels que le killifish africain pourraient aussi ouvrir de nouvelles pistes pour la recherche.

Questions prioritaires :

– ***Décrypter les horloges biologiques/ épigénétiques impliquées dans le processus de vieillissement et déterminer comment les manipuler pour améliorer la santé.***

– ***Identifier les biomarqueurs les plus appropriés pour suivre l'âge biologique de manière non invasive.***

– ***Découvrir de nouveaux mécanismes fondamentaux du vieillissement.***

III. Le cancer comme pseudo-organe : une autre logique associative

Dans un contexte où les études à l'échelle de la cellule unique permettent des avancées considérables, il est primordial de maintenir une vision globale et intégrée et de concevoir les cancers comme des organes « aphysiologiques ». Ces structures reposent sur des interactions continues et dynamiques avec les autres cellules de l'organisme. Les cellules tumorales dérivent, déroutent et reprogramment des acteurs cellulaires spécialisés jusqu'à aboutir au remodelage du tissu originel. Les fonctions primaires des cellules intra et péri-tumorales sont alors mises à profit par ce « pseudo-organe » dont le développement se fait au détriment du bon fonctionnement de l'organisme.

A. Micro-environnement tumoral et dialogue intercellulaire

Au cours du processus de carcinogénèse, les cellules non-tumorales et tumorales s'organisent pour former une structure tissulaire pathologique, elle-même au contact d'un environnement péri-tumoral.

Trop longtemps décrits comme des tissus de soutien aux cellules cancéreuses, les cellules du microenvironnement intratumoral, ou stroma, sont maintenant reconnues comme des acteurs majeurs de la carcinogénèse, des stades pré-néoplasiques aux stades les plus agressifs et métastatiques. La richesse et la complexité du compartiment stromal offrent autant de possibilité à la tumeur de potentialiser son activité que d'options thérapeutiques pour améliorer la prise en charge des patients. Ainsi, repousser les limites de notre compréhension du rôle des fibroblastes associées au cancer, de leur origine, de leur plasticité et des

divers impacts biologiques associés à leur hétérogénéité constitue un axe majeur. De même, l'étude de la mise en place et de l'efficacité des réseaux vasculaires, lymphatiques et nerveux doit être une préoccupation prioritaire tant leur implication dans l'accessibilité thérapeutique et l'évolution de la structure tumorale est fondamentale. L'autre composante du stroma, dont la tumeur détourne la fonction primaire, est le système immunitaire qui est un élément prépondérant de l'agressivité et de la plasticité des cellules tumorales. Ainsi, déterminer l'impact des cellules immunitaires au sein du stroma et leur modulation par cet environnement permettrait d'améliorer l'efficacité des immunothérapies et de comprendre leurs effets secondaires et les résistances ou absence de réponse. Enfin, de nombreux cancers sont décrits comme des pathologies métastatiques car principalement diagnostiqués à ce stade. Ainsi, un effort particulier doit être réalisé dans notre compréhension des processus associés à l'établissement de la niche métastatique et donc dans le dialogue mis en place entre les cellules tumorales et l'environnement « sain » d'un organe métastasé.

Mais, au-delà de notre capacité à déterminer la composition cellulaire du stroma d'une tumeur et prédire son impact biologique sur le développement et l'évolution de la tumeur, dont la résistance aux traitements, c'est bien la mise en place de l'organisation multi-cellulaire et donc les connexions/communications réciproques entre ces différents types cellulaires qu'il faut appréhender. Ainsi, l'étude du mode de communication « complexe » de la cellule maligne avec son micro-environnement, allant des vésicules extracellulaires, aux cargos multiples, émerge comme un axe de recherche majeur.

Questions prioritaires :

– Identifier les mécanismes par lesquels les différentes composantes cellulaires interagissent pour façonner la construction puis l'évolution des tumeurs. Caractérisation à l'état « basal », dans les contextes thérapeutiques et de progression.

– ***Cartographier et phénotyper les différentes composantes cellulaires des micro-environnements intra et péri-tumoraux et leur corrélation avec les caractéristiques biologiques des tumeurs.***

– ***Approfondir nos connaissances sur les modes de communication « complexe » entre cellules tumorales et micro-environnement, dont les vésicules extracellulaires, afin d'exploiter le langage de la communication cellulaire comme source d'outils thérapeutiques.***

B. Détournement et exploitation des réseaux sanguins, lymphatiques et nerveux dans la tumorigénèse

Des études princeps d'anatomistes ont très tôt mis en exergue les similarités dans l'architecture, la typologie et l'organisation en réseau des systèmes vasculaires et nerveux. Les études mécanistiques ont en effet confirmé la redondance des molécules impliquées (adhérence, migration, guidage) et des modes opératoires qui sous-tendent le comportement dynamique de l'élaboration de ces réseaux, à l'échelle cellulaire, matricielle et tissulaire. Parallèlement, les mécanismes de détournement et d'adaptation des systèmes vasculaires ont rapidement été considérés comme des marques de la tumorigénèse, faisant l'objet d'un grand nombre d'études fondamentales à visée translationnelle. Dans cette thématique, les axes de recherche développés visent à mieux comprendre les mécanismes dynamiques de formation des vaisseaux sanguins, souvent définis à tort comme anarchiques et inefficaces dans la tumeur. Outre des approches anti-angiogéniques ambitionnant la destruction du réseau vasculaire tumoral, les chercheurs abordent les questions de normalisation vasculaire, de co-option, de perméabilité et de fonctionnalité des réseaux vasculaires, et les interactions avec l'ensemble des composants des vaisseaux. À ce titre, le réseau lymphatique émerge également

comme une voie privilégiée d'échanges d'informations métaboliques et immunitaires, entre la tumeur et l'organisme.

Enfin, l'étude des systèmes nerveux central et périphérique dans le cancer a longtemps subi un cloisonnement paradoxal, étant donné les homologies structurelles et moléculaires entre système nerveux et vasculaires. Actuellement, l'approfondissement de notre compréhension des phénomènes d'invasion péri-neurale et de remodelage neural revêt un intérêt crucial pour aborder notamment notre capacité à traiter la douleur, un critère majeur de non-accès aux traitements chimio-thérapeutiques les plus efficaces.

L'ensemble de ces axes de recherche focalisés sur le détournement des réseaux vasculaires et nerveux au cours de la tumorigénèse représente une interface importante avec d'autres d'Instituts du CNRS favorisant les interactions avec la chimie pour l'élaboration de nouvelles sondes intra-vitales ou avec la physique pour la caractérisation des paramètres mécaniques (flux, cisaillement, etc.) afin d'enrichir les connaissances dans ce domaine et leurs possibles applications.

Questions prioritaires :

– ***Comprendre les dérégulations des systèmes vasculaires et nerveux, et prendre en compte leurs composantes mécaniques, chimiques et électriques, au cours de la tumorigénèse.***

– ***Comprendre les liens entre la tumeur et l'organisme via les réseaux de communication et le traitement des flux d'informations entrant et sortant.***

C. Niches et cellules souches tumorales

Les cellules souches cancéreuses (CSC) ou cellules initiatrices de tumeurs représentent une sous-population minoritaire de cellules de la masse tumorale qui possèdent des caractéristiques

téristiques d'auto-renouvellement et de pluri-potence. Généralement en quiescence, les CSC ont également la capacité de proliférer soit pour assurer leur maintien (auto-renouvellement), soit pour la genèse de cellules tumorales progénitrices ou de cellules tumorales différenciées. Résistantes à la plupart des thérapies anti-tumorales, les CSC peuvent repeupler la masse tumorale après les traitements anti-cancéreux. De ce fait, les CSC qui initient et maintiennent la tumeur, sont également considérées comme responsables de la rechute tumorale et du développement des métastases.

Malgré les avancées réalisées dans ce domaine, de nombreuses questions persistent. Ainsi, la caractérisation des CSC et l'identification des cellules à leur origine nécessitent d'être consolidées notamment au moyen d'études *in situ* s'appuyant sur des modèles expérimentaux permettant de suivre et de tracer individuellement des cellules malignes au sein de leur environnement natif. Essentielles pour la compréhension du développement des cancers, ces études sont complexifiées par l'existence d'une plasticité qui confère aux cellules cancéreuses non souches des propriétés de CSC. Dans ce contexte, élucider les mécanismes impliqués dans le maintien ou l'induction d'un état souche dans les cellules tumorales devient primordial. En effet, la différenciation d'une cellule tumorale n'est pas forcément irréversible et elle pourrait se reprogrammer pour acquérir des caractéristiques de cellules souches, en fonction des signaux qu'elle reçoit de l'environnement et des traitements auxquels elle est exposée. La connaissance des mécanismes contrôlant l'activité des CSC et leur état souche constituent donc un enjeu majeur. À cet égard, ces dernières années ont connu un essor de travaux portant sur l'impact du microenvironnement, sa composition ionique, ses interactions juxtacrines et paracrines, ainsi que ses propriétés biomécaniques sur les CSC, travaux qu'il convient de poursuivre afin de disposer d'une vision intégrée concernant les mécanismes responsables de la genèse, du maintien et de la plasticité des CSC. En parallèle, la compréhension du rôle des CSC dans l'établissement de la niche tumorale et notamment dans le tropisme des mé-

tases vers un organe privilégié constitue un axe majeur d'investigation susceptible d'améliorer l'efficacité des traitements anti-cancéreux.

Questions prioritaires :

– **Déterminer les mécanismes de plasticité des cellules tumorales permettant l'acquisition de caractéristiques CSC et leur impact dans l'évolution de la pathologie, notamment dans les phénomènes de récurrence et de résistances.**

– **Étudier l'implication des CSC dans l'établissement de la niche tumorale et leur connexion avec les cellules du microenvironnement intra et péri-tumoral.**

D. Reprogrammation métabolique

L'effet dit Warburg mis en évidence dans les années 1930 décrit l'activation de la glycolyse en condition aérobie permettant aux cellules tumorales de stimuler les voies de biosynthèse et de contrôle du stress oxydatif nécessaires à la prolifération. Cette reprogrammation du métabolisme des cellules malignes est un phénomène général. Cependant, la caractérisation de tumeurs présentant un métabolisme oxydatif plutôt que glycolytique a largement complexifié notre compréhension des mécanismes impliqués. Les progrès des techniques de mesure de flux métaboliques ont révélé des profils bio-énergétiques très variés en fonction des types tumoraux et de leurs stades d'évolution, allant de l'addiction à la glutamine, à l'acétate ou aux acides gras. De plus, l'état métabolique de la cellule module directement l'épigénome et participe donc à la régulation de l'expression génique. En outre, les cellules tumorales produisent des métabolites ayant une activité transformante paracrine (le 2-hydroxyglutarate est un exemple de ce type d'oncométabolite) et modifient à leur profit le métabolisme des cellules de leur micro-environnement.

Plus récemment, un dialogue métabolique entre cellules tumorales et cellules immunitaires intra ou péritumorales utilisant les mêmes ressources en nutriments a été mis en évidence. Enfin, la prise en compte des interrelations hôte/microbiote est aussi primordiale. Il est avéré que le microbiote influence le micro-environnement tumoral du fait de son effet sur l'activité du système immunitaire mais également *via* sa capacité à influencer la physiologie de l'hôte. Ainsi, il est devenu patent que l'étude du métabolisme des cancers ne peut plus être limitée à la tumeur mais doit être intégrée dans le cadre d'une analyse concernant celle-ci comme un élément d'un écosystème métabolique évolutif dans lequel le micro-environnement et l'organisme jouent un rôle majeur.

Le ciblage du métabolisme constitue aujourd'hui une perspective tangible et prometteuse de nouvelles stratégies thérapeutiques, champ de recherche dans lequel sont engagés plusieurs laboratoires dépendants de la section.

Questions prioritaires :

– **Déterminer les mécanismes de reprogrammation métabolique, leur plasticité et l'influence de ces mécanismes dans les différents types cellulaires composants les tumeurs.**

– **Déterminer, à l'échelle supracellulaire, les modulations métaboliques de l'hôte en corrélation avec le développement tumoral.**

IV. Modèles, approches, outils

Au cours de la dernière décennie se sont développées en biologie de nouvelles approches qui ne sont plus basées *stricto sensu* sur un raisonnement scientifique classique de

type hypothético-déductif. Ces nouvelles méthodes consistent à poser une question sans formuler une hypothèse *a priori* grâce à des approches descriptives à grande échelle et haut débit dites « omiques » et dont la génomique est une illustration probante. Ces approches omiques sont de plus en plus performantes, aussi de moins en moins onéreuses, et nécessitent des outils robotisés et un traitement statistique et bio-informatique de méga-données débouchant sur des modèles mathématiques prédictifs. Ces derniers doivent alors être testés dans un système biologique adéquat afin d'évaluer la pertinence des prédictions. Alternative-ment, les données peuvent être déposées dans des bases de données publiques dans l'attente d'analyses ultérieures (data-mining). Les études omiques sont généralement accessibles sur des plateformes et des plateaux techniques, au sein d'infrastructures nationales ou de consortiums internationaux car elles nécessitent l'acquisition de matériels coûteux et d'une main d'œuvre technique de haut niveau.

Sur le plan des technologies, la microfluidique est en plein essor, en particulier pour des analyses génomiques et transcriptomiques sur cellules uniques. En effet, les analyses « single cell » sont devenues déterminantes dans l'étude du développement, de la différenciation, des voies de signalisation et de la pathologie. Elles permettent également d'étudier l'hétérogénéité cellulaire dans un micro-environnement contrôlé.

La recherche en biologie fondamentale sur les thématiques couvertes par la section nécessite également la possibilité de manipuler l'expression de gènes *in vivo* et *in vitro*. Les progrès réalisés dans les approches permettant l'édition du génome (TALEN, ZFN mais surtout CRISPR/Cas9) ainsi que dans le développement d'outils de vectorisation permettent dorénavant la construction de nouveaux modèles expérimentaux, en particulier animaux, qui restent une priorité en biologie et en particulier dans les secteurs disciplinaires de la section. Concernant le développement de modèles animaux, les approches fondées sur le système

CRISPR/Cas9 ouvrent dorénavant la possibilité d'éditer le génome « *in vivo* » avec une gamme variée de modifications génétiques ou la sur-expression d'un gène d'intérêt. Les modifications génétiques de cellules souches embryonnaires sont en effet très grandement facilitées par ces nouvelles techniques qui s'ajoutent aux approches conventionnelles de transgénèse chez la souris et permettent d'étendre le développement de modèles animaux à des espèces plus difficilement manipulables génétiquement tels que le nématode, le poisson zèbre, le porc, les ovidés et les bovidés. De plus, le développement de stratégies pour le transfert de matériel génétique *in vivo* dans un organe/type cellulaire donnée *via* des vecteurs viraux dont le tropisme naturel a été modifié ou bien *via* des nanoparticules offre la possibilité de développer des modèles animaux dans lesquels la modification génétique désirée survient à des périodes bien définies et donc de s'affranchir de problèmes développementaux induits par la modification génétique considérée.

Depuis quelques années, la génération de cellules souches pluripotentes induites (iPSC) à partir, entre autres, de fibroblastes humains, a modifié considérablement notre approche de l'étude de certains processus physio-pathologiques. En effet, il est possible d'obtenir de nombreux types cellulaires à partir de cultures iPSC et d'évaluer les propriétés biologiques et moléculaires de cellules dérivées de patients présentant une altération génétique (ou épigénétique) donnée. En outre, la culture de cellules iPSC en 3D (cultures d'organoïdes, bio-printing) permet de reconstituer des mini-organes aussi appelés « organ-on-chips » qui présentent des similitudes structurales et développementales avec des organes humains et offrent la possibilité de comprendre les comportements cellulaires au sein d'un microenvironnement proche de celui trouvé *in vivo*. En outre, les systèmes micro-fluidiques 3D permettent d'appliquer des contraintes mécaniques ou des gradients de molécules, et sont adaptés pour l'évaluation de drogues à haut débit. Cependant, ces systèmes sont loin d'inclure tous les types cellulaires d'un tissu (notamment les constituants

vasculaires et immunitaires). Pour cette raison, l'utilisation d'organismes entiers (e.g. drosophile, rat, souris, poisson, etc.) reste incontournable pour comprendre le rôle d'un gène ou d'une population cellulaire donnée au sein d'un environnement natif et pour prendre en compte les dialogues inter-organes décisifs dans les régulations physiologiques. Les expériences sur animaux, en respectant les réglementations éthiques visant à limiter le plus possible la souffrance animale, constituent toujours des modèles indispensables pour l'étude des interactions entre cellules tumorales et cellules immunitaires, ainsi que pour le test de thérapies et l'évaluation de leurs propriétés pharmacocinétiques. La combinaison de plusieurs modèles est donc essentielle.

L'ensemble de ces modèles, associés aux nouvelles techniques d'imagerie cellulaire (microscopie intravitale, procédés de transposition des tissus, optogénétique) et d'analyses moléculaires sur cellules uniques constituent des approches puissantes permettant d'interroger l'hétérogénéité cellulaire et de comprendre les relations entre différentes populations cellulaires.

Questions prioritaires :

– Comment analyser et valoriser les données omiques sur le plan statistique et bio-informatique ? Faut-il sous-traiter la recherche à des plateformes ou infrastructures nationales ou intégrer ces compétences dans les laboratoires ?

– Comment, dans un contexte de compétition croissante, promouvoir une conduite responsable et éthique des recherches ?

– Comment former et protéger efficacement les personnels aux nouveaux risques biologiques (ex : laboratoires P3, zones blanches pour les nanoparticules, animaleries équipées d'appareils d'analyse, etc.) ?

Conclusion

En préambule de cette conclusion, nous souhaiterions insister sur le fait que ce rapport n'est ni exhaustif, ni prescriptif. Nous avons tenté de recenser les différents domaines de la recherche relevant des spécialités de la section dont nous considérons qu'ils sont émergents ou en plein essor. Cependant, la relative imprévisibilité de la portée des découvertes scientifiques et de leur assimilation dans un champ spécifique de la recherche font obstacle à la volonté totalisante d'un rapport. Il ne s'agit pas, non plus, d'encourager les chercheurs à se cantonner à des thématiques que nous jugeons prioritaires. La liberté d'explorer est consubstantielle à la recherche.

Les différents sujets que nous avons discutés dans ce rapport balisent de nouveaux territoires de la recherche. Ainsi, la perspective intégrative en physiologie qui est voisine des aspects théoriques de la biologie des systèmes est de plus en plus partagée. Elle traduit le besoin de hiérarchiser les données moléculaires massives (omiques) mais aussi celles d'imagerie et de les intégrer dans des modèles d'interactions dynamiques multi-échelles aux niveaux de la cellule et de l'organe. Les travaux sur le microbiote ainsi que ceux sur la distinction « du soi et du non soi » dans le cadre du modèle de discontinuité en immunologie remettent en cause la notion classique d'individualité biologique pour lui substituer celui de symbionte ou d'holo-symbionte qui correspond à un niveau de description plus adéquat. Le réductionnisme génétique ou épigénétique ne peut suffire, lui non plus, à comprendre la tumorigenèse et de modèles originaux concevant la tumeur comme un « pseudo-organe » interagissant avec l'organisme *via* de nouveaux modes associatifs sont en train d'être conceptualisés. Ces recherches contribuent donc à l'émergence de paradigmes fondateurs en biologie.

Il faut aussi insister sur les enjeux en santé publique de ces travaux. En effet, les maladies non transmissibles (cancer, diabète, pathologies cardiovasculaires, etc.) sont à l'origine de

plus de deux-tiers des décès dans le monde. Les changements des modes de vie avec leurs incidences sur le rythme circadien et les dégradations de l'environnement dues à l'activité anthropique, en particulier l'essaimage des polluants, sont associés à l'étiologie de ces maladies chroniques. Enfin, l'augmentation de l'espérance de vie qui est à mettre au crédit des progrès de la médecine et de l'hygiène a un impact socio-économique fort avec l'augmentation de l'incidence des maladies liées au vieillissement. La compréhension des mécanismes morbides mis en jeu, leurs modélisations et la caractérisation de bio-marqueurs d'exposition ou la conception de nouvelles approches thérapeutiques font partie intégrante des recherches développées par les laboratoires de la section.

La section 24 réunit les expertises complémentaires pour traiter de la diversité de ces types de sujet. Les scientifiques relevant de cette section travaillent fréquemment en collaboration avec des chercheurs relevant d'autres sections de l'INSB, dont les sections 22 et 27. Cette collaboration s'étend aussi à d'autres EPST/EPIC comme l'INSERM, l'INRAE et le CEA. Ces interactions fructueuses entre disciplines vont au-delà de la biologie et impliquent non seulement d'autres instituts du CNRS comme ceux d'écologie (INEE), de chimie (INC), de physique (INP), de modélisation mathématique (INSMI), mais aussi mobilisent les savoirs des sciences humaines et sociales (INSHS). Cet interfaçage contribue à la richesse et à la vitalité de la section ainsi qu'à sa volonté de promouvoir l'interdisciplinarité.

L'évolution des approches technologiques requises pour le développement de ces recherches influe sur la composition des équipes/unités de recherche. Il est devenu, en effet nécessaire d'intégrer de nouvelles compétences en bio-informatique, et à terme, en intelligence artificielle. Ce type d'approche pose donc la question de la formation des personnels ainsi que celles relevant du stockage, de la propriété et de la sécurité des données. Un autre sujet au cœur des motifs de réflexion de la section est celui des modèles animaux. Si ceux-ci restent indispensables pour les discipli-

nes de la section, la question des modèles de substitution pertinents doit être systématiquement posée. Cette évolution des pratiques est conforme aux nouvelles réglementations européennes sur l'expérimentation animale et la section soutient la démarche éthique dite des 3R : remplacer, réduire et améliorer l'emploi d'animaux en recherche.

Un mouvement de fond est en cours qui a pour objectif de transformer les modes de diffusion de la science. Sur le modèle des archives ouvertes largement développé en mathématiques notamment, la biologie a récemment vu émerger la pratique de publications ouvertes directement accessibles à la communauté (sur des serveurs comme BioRxiv, ASAPbio, Faculty of 1000...). Ces prépublications représentant un mode de communication des données scientifiques, pour lequel l'engouement est croissant comme en témoigne l'augmentation du nombre de dépôts, de déposants, de contributions et de citations. La prépublication est quasi instantanée, accessible, permanente, ouverte à la discussion, gratuite, protégée et identifiée par un « *doi* ». Il faut noter que de plus en plus de journaux et éditeurs proposent désormais un lien entre la soumission classique d'un manuscrit et son dépôt sur un serveur de prépublications. Cependant, la visée n'est pas bibliographique (il n'y a pas encore de référencement sous PubMed), les affiliations et les données ne sont ni vérifiées ni évaluées par des pairs. Il y a donc un risque en conservant des données inexactes, voire orientées par des groupes de pression, de ralentir ou influencer la recherche scientifique. Il faut donc informer et accompagner les chercheurs, et associer les institutions dans cette démarche en plein essor. La section est en faveur de la politique de prépublication qui répond à un besoin de partage rapide des informations scientifiques et qui s'affranchit du modèle économique des maisons d'édition. Cependant, elle estime aussi qu'il faut conserver toute sa place aux articles et à la visibilité des journaux dans lesquels ils sont publiés pour le recrutement, la promotion et l'évaluation.

Environ 250 chercheurs statutaires relèvent aujourd'hui de la section. Ils travaillent majori-

tairement dans des laboratoires situés dans les grandes villes françaises, avec par ordre décroissant en fonction du nombre de chercheurs : Paris, Lyon, Montpellier, Toulouse, Nantes, Marseille et Villejuif. La vitalité des programmes que nous avons décrits dépend, bien sûr, de l'inventivité et de la détermination des scientifiques et des personnels ITA ainsi que des conditions dans lesquelles ils sont amenés à exercer leur mission. Mais, elle est aussi directement tributaire des choix politiques visant à soutenir et promouvoir l'emploi dans la recherche publique. Or, force est de constater que la situation s'est dégradée de manière extrêmement préoccupante au cours des dernières années avec la suppression de 50 postes ouverts au concours CRCN en 2019. L'impact a été direct sur la section puisque depuis le début de notre mandature en 2016, nous avons perdu deux postes (soit une réduction de plus de 30%) au concours CRCN. La situation est aussi alarmante pour le recrutement des ITA dans les laboratoires. À cet égard, nous tenons à réaffirmer ce qui avait déjà été souligné dans le rapport de la section de 2014, à savoir que ces personnels « jouent un rôle moteur dans la transmission des techniques, le maintien des compétences ainsi que dans la gestion des Unités », que « le non-renouvellement des postes pérennes entraîne une perte de savoir-faire », et « que la faible évolution des carrières ainsi que le nombre restreint des promotions sont un facteur important de démotivation des ITA ». Nous adhérons à ce constat qui est toujours d'actualité ainsi qu'aux recommandations qui avaient été faites pour inverser cette politique de recrutement préjudiciable au fonctionnement des Unités et pour le développement de plans de formation adaptés permettant aux personnels ITA de se former aux nouvelles technologies. Dans ce contexte où les choix politiques ont pour conséquence de saper le dynamisme de la recherche publique, dont celle développée par les laboratoires dépendants de la section, et d'affaiblir la position de la France au niveau international, les membres de la section soutiennent les propositions pour la recherche qui ont été formulées par le Comité National en 2019.

SECTION 25

NEUROBIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET CELLULAIRE, NEUROPHYSIOLOGIE

Composition de la section

Philippe FAURE (président de section), Thibault COLLIN (secrétaire scientifique), Pierre AFFATICATI, Gilbert BAILLAT, Abdelhamid BENAZZOUC, Laurent BEZIN, Emmanuel BOURINET, Sylvette CHASSEROT, Michael DEMARQUE, Étienne HERZOG, Catherine LE MOINE, Éric LINGUEGLIA, Nathalie MANDAIRON, Isabelle NONDIER, Fatiha NOTHIAS, David PERRAIS, Daniela POPA, Marie-Claude POTIER, François RASSENDREN, Marie-Catherine ROUSSELIN-TIVERON.

Résumé

L'objectif des neurosciences reste toujours le même, comprendre le fonctionnement du cerveau et ses principes d'organisation. Poursuivre cet objectif nécessite de développer de nouvelles techniques d'acquisition de données, de manipulation et d'analyse. Les développements technologiques devraient amener très rapidement le domaine vers des acquisitions de données massives, multi-échelles et dynamiques qu'il faudra intégrer. Les neurosciences ont aussi un programme sur les maladies neurodégénératives ou psychiatriques. Il s'agit de comprendre et décrire les pathologies mais aussi de les traiter. Si le domaine progresse, le besoin pressant de résultats laisse parfois à penser que les espoirs fondés sur les approches de neurosciences ont été mal

placés. Il est important de comprendre que ces analyses, la compréhension du système nerveux et de ses pathologies est un domaine jeune face à la complexité du sujet et qu'ici le temps long est la référence.

Introduction

Les thématiques de la section 25 concernent la biologie des cellules des tissus nerveux, la mise en place des cellules neurales au sein des réseaux, jusqu'à leurs fonctions physiologiques et pathologiques. La section s'intéresse à leurs rôles dans l'intégration des signaux à la base de

la perception, des comportements et de la cognition. Ce rôle est analysé dans différents modèles animaux ou expérimentaux (cellules en culture, organoïdes, moelle épinière, cerveau entier...) permettant une analyse comparée et évolutive de ces fonctions. Les champs d'expertise de la section couvrent donc les domaines de la neurobiologie cellulaire et moléculaire ainsi que de la neurophysiologie. Les approches utilisées dans ces domaines sont *de facto* multi-échelles et multi disciplinaires.

L'évolution des neurosciences au cours de ces dernières années a été fortement marquée sur un plan technologique par la mise au point de nouveaux outils et sur un plan théorique par l'émergence de nouveaux concepts. Depuis plusieurs décennies, on espère une neurophysiologie intégrée avec une analyse multi-échelle et dynamique du cerveau humain et une révolution liée à l'émergence des neurosciences computationnelles. Ces domaines ont certes progressé mais ces approches bloquent encore conceptuellement sur la complexité des comportements qui naissent de la dynamique des circuits mais aussi d'une immersion de l'individu dans un environnement. Il est par contre intéressant de constater que des progrès technologiques impressionnants ont très récemment émergé et permettent une interaction toujours plus fine et précise avec le système nerveux à la fois pour mesurer ou perturber son activité. Ce rapport présente quelque unes des avancées les plus pertinentes en mettant l'accent sur les perspectives qui s'ouvrent dans des domaines importants.

Enfin, la recherche en neurosciences présente certaines particularités que nous aborderons dans ce rapport. Cela concerne en particulier l'expérimentation animale. Même si cette question concerne d'autres domaines de la biologie, l'étude des comportements la rend centrale pour les neurosciences, qui doivent évoluer pour s'adapter aux préoccupations légitimes de la société dans ce domaine. Un autre aspect concerne la multidisciplinarité. Question commune à de nombreux domaines mais qui est l'essence des recherches en neurosciences. Ceci n'est pas sans conséquences

sur l'organisation et la structuration de la recherche et de ses institutions.

I. L'évolution des méthodes expérimentales en Neurosciences

Les grandes étapes de la recherche sur le système nerveux ont toujours été associées aux développements technologiques. Leur nombre et leurs exploitations ont exposé ces dernières années. L'étude des structures cellulaires de taille sub-micrométrique, dont les synapses, a grandement bénéficié des avancées récentes des microscopies électronique et optique, notamment les techniques optiques non linéaires et de super-résolution, ainsi que la microscopie ultrasonore super-résolue. Les méthodes de clarification d'échantillons biologiques ont permis de suivre le trajet de voies axonales dans l'ensemble du cerveau et d'évaluer leur connectivité très précisément, quand les techniques d'expansion de tissus ont permis de repousser encore les limites de résolution de leur observation. L'analyse moléculaire telle que le séquençage d'ARNm sur cellule unique a permis de définir de manière exhaustive les types cellulaires composant un tissu nerveux. Enfin, il est désormais possible, avec un nombre croissant d'approches, d'enregistrer et de manipuler de larges ensembles de neurones sur animal vigile (électrophysiologie *in vivo*, opto- et chemo-génétique, nouveaux biosenseurs fluorescents permettant des études dynamiques incluant des senseurs calciques couplés à la microscopie multi-photonique). En augmentant nos capacités d'interroger le fonctionnement des systèmes, ces technologies permettent d'affiner notre compréhension des circuits nerveux. Elles orientent également le développement de futures thérapies. On notera que, pour la plupart, ces techniques se situent à la croisée des neurosciences et de la physique pour les aspects optiques, de la

chimie, de l'ingénierie des protéines et de l'ingénierie et l'analyse des données. En effet pour traiter toutes ces données complexes, les progrès de l'analyse automatisée ont été également déterminants. Ceci renforce nos propos sur la nature fondamentalement pluridisciplinaire des neurosciences actuelles.

Dans ce rapport nous avons distingué des objets (synapses, organelles, organoïdes) et des champs et méthodes (électrophysiologie, comportements, interfaces cerveau-machine).

A. Neurosciences moléculaire et cellulaire

1. Structures atomiques

Les avancées récentes en cristallographie et surtout en cryo-microscopie électronique (cryo-EM, prix Nobel de chimie 2017) ont accéléré l'identification des structures tridimensionnelles de nombreuses protéines neuronales avec une résolution atomique ou quasi-atomique, dont certaines qui étaient réfractaires à la cristallisation. Cela a permis de progresser dans la compréhension du fonctionnement des canaux ioniques et des récepteurs neuronaux. La cryo-EM ouvre également la possibilité d'étudier les structures de complexes dynamiques et de grande taille. C'est le cas des complexes protéiques synaptiques, dont l'étude était jusque alors quasiment impossible. Cette technique simplifie l'étude structurale des protéines et complexes membranaires et permet de le faire dans des environnements (nanodisques, liposomes...) plus élaborés et physiologiquement plus proches des différents environnements cellulaires. La puissance de ces données structurales s'entend en particulier lorsqu'elles sont combinées avec des approches moléculaires, cellulaires et intégrées, voire de bio-ingénierie, en conditions normales ou en situation pathologique. Il est à regretter que le coût important de ces techniques, allié au relatif sous-investissement français font que seulement trois cryo-EM sont actuellement en service sur le territoire.

2. La synapse

La synapse est une unité d'organisation hautement spécialisée du système nerveux central, constituée d'un élément présynaptique (bouton axonal) et d'un élément postsynaptique (souvent une épine dendritique). Plusieurs décennies d'études électrophysiologiques, pharmacologiques et moléculaires ont démontré l'importance de la fonction synaptique, d'ailleurs remarquablement conservée dans le règne animal, et ont mis en exergue sa plasticité comme propriété universelle des circuits neuronaux.

Les avancées technologiques permettent une description de plus en plus fine de l'architecture synaptique, des acteurs moléculaires et des processus dynamiques qui gouvernent leur formation et leur fonctionnement. Une synapse typique mesurant moins de 1 µm de diamètre, la microscopie optique de fluorescence en super-résolution (MOFSR, prix Nobel de chimie 2014), a permis de déterminer cette architecture qui conditionne le fonctionnement synaptique. Les techniques de super-résolution se divisent en deux familles, qui reposent soit sur le principe de déplétion stimulée (microscopie STED), soit sur la détection successive de fluorophores individuels (microscopie PALM ou STORM). Toutes deux permettent des résolutions jusqu'à dix fois supérieures aux techniques classiques (20-50 nm). Elles sont complémentaires, avec des champs d'utilisation et des limites différentes. La microscopie STED possède la résolution temporelle de la microscopie confocale mais elle est limitée par l'intensité lumineuse nécessaire. Les techniques PALM ou STORM, plus sensibles, sont encore limitées à des échantillons fins et par la durée d'acquisition qui peut atteindre une heure pour une image de haute résolution.

La plasticité synaptique, modification des propriétés synaptiques dépendante de l'activité, est considérée comme étant le substrat subcellulaire de l'apprentissage, de la mémoire et de l'adaptation à l'environnement. Les mécanismes liant modifications cellulaires et processus d'apprentissage restent toutefois largement

à explorer. Les outils disponibles pour mesurer et contrôler l'efficacité et la plasticité synaptique *in vivo*, dans des conditions pertinentes sur le plan comportemental, restent en effet encore limités. Le développement d'outils permettant de manipuler dans l'animal des voies de signalisation synaptiques spécifiques sont en cours. Une étape clé sera franchie lorsque la résolution spatiale et temporelle de ces outils sera suffisante pour manipuler la synapse à une échelle de temps similaire à celle de l'induction d'une plasticité.

3. Ultrastructures et organelles

Les neurones sont des cellules particulières, très compartimentalisées, projetant des prolongements axonaux ramifiés pouvant atteindre une longueur totale avoisinant le mètre et pouvant transporter des molécules sur des distances importantes. Les cellules gliales, et notamment les astrocytes, ont également une morphologie complexe comprise que très récemment grâce à la microscopie optique de super-résolution. La neurobiologie subcellulaire a connu des avancées importantes avec la mise en évidence de réactions biochimiques et d'organelles dans des compartiments inattendus. Nous pouvons citer la traduction au niveau des synapses, la sécrétion d'ARNm d'un neurone à l'autre ou la propagation de protéines repliées dans une conformation toxique, dont les mécanismes restent à élucider. Une meilleure compréhension du rôle des organelles dans la physiologie et la pathologie du neurone nécessite des analyses ultrastructurales, sur des cellules fixées ou sur des cellules vivantes, par vidéo-microscopie. Celle-ci est limitée par la rareté des plateformes équipées de microscopes permettant d'atteindre des résolutions spatiales et temporelles suffisantes pour suivre, par exemple, la libération synaptique ou le transport axonal rapide dans des compartiments de quelques dizaines de nanomètres. Des développements technologiques seront nécessaires pour visualiser ces organelles *in vivo*.

4. Les méthodes de clarification optique des échantillons

L'extraction d'informations structurales et moléculaires détaillées à partir de systèmes biologiques intacts est un enjeu important. Ces dernières années ont vu l'émergence de nouvelles méthodes, dites de clarification (ou transparençisation), qui facilitent la manière dont on peut étudier l'organisation anatomique du cerveau, mais également d'autres tissus. L'enjeu est d'obtenir des images à haute résolution de populations cellulaires en trois dimensions, dans des tissus intacts. Le principe général est de remplacer l'eau des tissus par un milieu dont l'indice de réfraction est proche de celui des composants principaux des cellules. Cette homogénéisation permet de minimiser la diffusion de la lumière responsable de la perte de signal et de résolution en profondeur. Ces techniques peuvent être utilisées seules ou couplées à d'autres méthodes histologiques (immunohistochimie, hybridation *in situ*...). Si les échantillons clarifiés peuvent être imagés avec toutes les méthodes de microscopie photonique, la microscopie à feuille de lumière est la plus adaptée aux échantillons de grande taille. Ces méthodes permettent de capturer l'ensemble de l'information disponible dans un échantillon et de réaliser des analyses en 3D. De multiples molécules fluorescentes qui se lient à des composants cellulaires spécifiques sont utilisées pour coder par couleur certaines composantes permettant ainsi de développer une organisation 3D des circuits. Ces approches sont combinées avec des méthodes d'imagerie d'activité, telles que par exemple des marqueurs d'activité neuronale comme C-Fos, permettant de visualiser l'activité de populations particulières au sein d'un réseau marqué. Elles offrent accès à des informations non seulement structurales et moléculaires mais aussi dynamique essentielles pour une compréhension intégrative des systèmes nerveux.

5. Les organoïdes

Un organoïde fait référence à une structure multicellulaire reconstruite dans un système de

culture tridimensionnelle censée reproduire la micro-anatomie d'un organe. De nombreuses preuves de concept ont été apportées qui illustrent la capacité de former des tumoroïdes, ou des micro-intestins. Ces structures peuvent être formées à partir de cellules souches embryonnaires mais aussi de cellules reprogrammées (iPSC), ce qui ouvre la possibilité de reconstruire des cérébroïdes humains. La première preuve de concept que des organoïdes cérébraux peuvent être reconstruits *in vitro* a été apportée par le laboratoire de J. Knoblich et M. Lancaster en Autriche en 2013. Cette preuve de concept a été rapidement suivie par la démonstration de l'impact du virus Zika sur l'altération de l'organogénèse cérébrale humaine et objectivant l'intérêt des organoïdes pour l'étude des problématiques neuro-développementales où les modèles animaux (par exemple murins) ne sont pas pertinents. La démonstration que les organoïdes cérébraux humains, après une période de différenciation de plusieurs mois *in vitro*, donnent lieu à la formation de réseaux de neurones électriquement actifs vient d'être réalisée, ce qui soulève de potentiels problèmes éthiques. Au total, les travaux publiés ou en cours qui montrent l'engouement de la communauté, laissent penser que les cérébroïdes deviendront des modèles importants pour l'étude du neurodéveloppement et de la neurophysiologie humaine. La plupart des travaux récents objectivent une forte volonté de la communauté 1) de transférer la méthodologie dans les laboratoires de neurosciences, 2) d'améliorer les techniques de cultures (sérialisation, influence des conditions de culture cellulaire) et 3) d'étudier le rôle de l'environnement sur l'auto organisation des cérébroïdes (matrices extracellulaires, rôle des forces mécaniques). Les travaux en cours laissent présager la mise en œuvre rapide des techniques d'étude et d'intervention classiquement utilisées dans les modèles animaux *in vivo* (enregistrement électrique, imagerie, génétique...). Parmi les enjeux majeurs à mettre en avant, la faisabilité de 1) réintégrer des fonctions de vascularisation *in vitro* et 2) modéliser des phénomènes ayant lieu dans le cerveau adulte (neurophysiologie, neuropharmacologie et maladies neurodégénératives) dans des modè-

les qui restent encore immatures malgré des temps de culture très long. Ces organoïdes peuvent également répondre à une voix de plus en plus forte sur l'éthique de l'utilisation des modèles animaux.

B. Neurosciences intégrative et quantification du comportement

La question posée par les neurosciences intégratives est celle des relations entre processus nerveux et processus cognitifs ou comportements. Ce champ de recherche se situe donc à l'interface entre sciences cognitives et neurophysiologie. Ces approches développées dans des modèles animaux relient les champs traditionnellement couverts par la section 25 (neurophysiologie) et la section 26 (sciences cognitives).

Le domaine oscille en permanence entre des approches réductionnistes et des approches holistiques. Par réductionniste s'entendent des approches qui tentent de réduire des processus aussi complexes que la pensée, la motivation, la peur à des processus simples. Elles supposent que si l'on collecte suffisamment d'informations sur les différentes parties, le fonctionnement de l'ensemble pourra être reconstruit ou, qu'au moins, il s'en trouvera éclairé. Les approches holistes essayent de saisir la complexité du système nerveux et de son fonctionnement dans son ensemble. Leur argumentaire, basé sur la physique des systèmes complexes, est que 1) les processus émergents (le comportement, les émotions...) ne peuvent être réduits en une somme de processus simples et que 2) redondance, non linéarité et dynamique font qu'un même comportement peut être produit par des circuits différents ou qu'un même circuit peut participer à différents comportements. La confrontation de ces deux types d'approches est nécessaire. Notons néanmoins que les tentations d'explication « mécanistique » et d'identification de causalités

ramènent régulièrement vers des approches plutôt réductionnistes.

1. Enregistrement de l'activité de circuits

Les opérations perceptuelles, comportementales et cognitives impliquent l'action coordonnée d'importantes populations neuronales dans de multiples régions du cerveau, aussi bien dans les cortex superficiels que les structures profondes. Décrypter comment ces activités à l'échelle du cerveau entier se coordonnent dans le temps et l'espace (dynamique spatio-temporelle) est à la base de la compréhension du fonctionnement du cerveau.

Depuis les premiers enregistrements électroencéphalographiques de nombreuses techniques ont été développées. Cela va des enregistrements extracellulaires de l'activité de populations *via* des champs (EEG, potentiel de champ locaux...), à l'activité simultanée de neurones isolés (enregistrement des potentiels d'action), ou à l'activité de cellules uniques (juxta-cellulaire ou patch clamp *in vivo*). Les électrodes extracellulaires en silicone permettent d'enregistrer l'activité neurale avec une excellente résolution spatiale et temporelle (inférieure à la milliseconde), mais avec seulement quelques dizaines de neurones par tige. Si en principe aucune limite physique n'empêche d'enregistrer un très grand nombre de neurones (plusieurs milliers), un certain nombre de verrous technologiques sont à dépasser, en particulier, le type de matériel biocompatible et l'estimation des dégâts neuronaux diffus, la dissipation de la chaleur et l'électronique d'amplification/digitalisation du signal. C'est dans l'idée de franchir ce palier que se sont inscrites l'initiative américaine « Brain Activity Map » qui ambitionne de cartographier la dynamique de tous les neurones du système nerveux en parallèle du connectome (identification de toutes les connexions entre les neurones), le développement d'électrodes en silicone toujours plus miniaturisées (« neuropixels » qui peuvent offrir 960 sites d'enregistrement répartis le long de tiges de 10 mm) ainsi

que des techniques de chirurgie (robot d'implantation chirurgicale Neuralink permettant l'implantation de 3000 électrodes couvrant toute la surface corticale de rongeurs). Ce domaine est pour l'instant largement dominé par les technologies « américaines », même si certains types d'électrodes spécifiques peuvent être fabriqués en France.

L'imagerie optique offre une plus grande couverture que l'électrophysiologie. Si pendant longtemps le problème était que la résolution temporelle nécessaire pour distinguer de façon fiable les potentiels d'action individuels n'était pas suffisante, de nouvelles sondes permettent d'obtenir des résolutions de l'ordre de la milli-seconde. *A priori*, ce type d'imagerie ne mesure toutefois pas les oscillations des potentiels de champs locaux. Les sondes les plus couramment utilisées sont les GCaMP, des rapporteurs fluorescents de la concentration intracellulaire de calcium, utilisés comme « proxys » de l'activité neuronale. Le bilan photonique pour l'imagerie simultanée d'un grand nombre de neurones et la technologie pour l'imagerie à toute profondeur du cortex sans aberration délétère restent un objectif difficile à atteindre. De nouvelles sondes fluorescentes génétiquement encodées sont apparues, permettant de suivre de façon ciblée les variations de concentrations de certains messagers intra- et extra-cellulaires. Plus récemment, des rapporteurs fluorescents des concentrations extracellulaires de neurotransmetteurs et neuromodulateurs (dopamine ou acétylcholine) ont été mis au point, pour suivre les dynamiques de ces messagers aux niveaux synaptique et extra-synaptique. L'intérêt de ces nouveaux rapporteurs est d'offrir des alternatives simples à la voltamétrie ou à la microdialyse.

On voit donc bien aujourd'hui des développements permettant d'interroger les activités du système nerveux dans une variété de modalités (chimique, optique, électrique), d'échelles de temps et de sensibilité, tout en couvrant une gamme d'échelle d'organisation de plus en plus large (du nanomètre au centimètre).

2. L'optogénétique et l'analyse des circuits

Ces dernières années ont vu l'explosion de méthodes basées sur le contrôle optique de l'activité de protéines ou autres molécules biologiques. Ces outils fournissent des moyens puissants pour manipuler et interroger les fonctions cérébrales avec une invasivité relativement faible mais surtout une précision spatio-temporelle sans précédent.

L'optogénétique permet une manipulation localisée des neurones par l'intermédiaire de protéines photo-activables. L'expression de ces protéines permet de cibler des populations de neurones spécifiques (en fonction de leur anatomie ou de leur activité récente). La dynamique d'activation-inactivation autorise un contrôle précis et réversible dans le temps. La possibilité d'activer ou d'inhiber simultanément des populations spécifiques de neurones en temps réel tout en enregistrant leur activité constitue une stratégie très puissante pour dis-séquer le fonctionnement de circuits neuro-naux, pour les perturber et pour tester les conséquences de ces perturbations sur les comportements. L'entrée en force de l'optogénétique dans le champ des neurosciences intégratives a conduit à développer des approches d'excitation et d'inhibition de l'activité de population de neurones pour définir des relations de causalité (notion de nécessité *via* l'inhibition et de suffisance *via* l'excitation) entre une activité neuronale dans un circuit et un comportement particulier. Cette approche "interventionniste de la causalité" se pose actuellement en référence pour comprendre les relations entre cerveau et comportement. Cette position dominante a tendance à réduire la nécessaire pluralité des concepts et des réflexions sur le fonctionnement des circuits. Son efficacité ne doit pas masquer le fait qu'elle n'aborde la question du fonctionnement du système nerveux central que sous l'angle particulier des microcircuits (perturbations à petite échelle sur des circuits restreints) et adopte une démarche réductionniste.

Les approches optogénétiques, basées sur l'expression d'opsines sensibles à la lumière, permettent l'excitation ou l'inhibition de l'acti-

tivité de populations de neurones. Elles agissent donc au niveau des réseaux. D'autres technologies, comme l'optopharmacologie (ou photopharmacologie) permettent de rendre des biomolécules endogènes sensible à la lumière. On citera l'exemple des composés (neurotransmetteurs) cagés ou de ligands photo-activables. Les premiers sont constitués d'un groupe protecteur clivable par stimulation lumineuse, entraînant une libération rapide de molécules biologiquement actives. Les seconds sont constitués de ligands qui changent de forme sous l'effet de la lumière, permettant le contrôle rapide et réversible de canaux ioniques ou récepteurs de neurotransmetteurs. D'autres techniques génétiques et chimogénétiques permettent d'attacher un module photosensible (protéique ou chimique) sur des protéines endogènes afin d'en contrôler leur fonction. Ces approches permettent un contrôle au niveau moléculaire de voies de signalisation neuronales endogènes.

3. Interface cerveau-machine (ICM)

Connecter directement une machine à un cerveau est non seulement un enjeu scientifique et technologique, mais aussi un enjeu de santé majeur. C'est un programme avec plusieurs objectifs. Si le plus évident concerne les applications médicales, avec le développement de prothèses ou d'orthèses, dont les exosquelettes, ces interfaces sont aussi des outils importants pour la recherche. D'un point de vue conceptuel, elles contribuent à comprendre la dynamique des circuits neuro-naux, leur plasticité et les relations réseaux-comportements. D'un point de vue technique, elles permettent des avancées pour améliorer les systèmes d'enregistrements et d'analyse des signaux. Les interfaces cerveaux-machines, pour leurs formes invasives, reposent sur l'implantation chronique d'électrodes dans les cortex moteurs ou pré-moteurs. Des méthodes mésoscopiques d'enregistrement de l'activité, comme les sondes sensibles au voltage sont aussi envisageables. Notons qu'il existe en France une communauté importante travaillant sur les interfaces non invasives qui utilise par

exemple les EEGs comme signal neuronal. Ces électrodes permettent de collecter l'activité d'une large population de neurones. Cette activité est transformée en temps réel en signal de contrôle d'une prothèse ou de tout autre élément d'une machine (curseur sur un écran...). À cette étape de contrôle, se rajoute maintenant une étape permettant de ramener en temps réel, des informations sur l'état de la prothèse (par ex proprioceptif et tactile) ou de la machine vers le cerveau par stimulations appropriées dans des cortex sensoriels. Ces feedbacks sensoriels peuvent être implémentés par des microstimulations intracérébrales ou par des méthodes optiques comme l'optogénétique. Les systèmes agissent donc en boucles fermées. Au-delà des aspects médicaux et de rééducation, ces systèmes permettent dans des modèles animaux, d'interroger la dynamique des circuits : comment les circuits neuronaux s'adaptent aux algorithmes de décodage imposés ? Quels rôles jouent les boucles de rétroactions dans ce qu'on l'on peut appeler l'incarnation (soit le fait de considérer la prothèse comme un élément corporel propre) ? Ces questions adressent des aspects fondamentaux du fonctionnement intégré des systèmes nerveux. Ce champ est en pointe pour le développement des implants, des électrodes de nouvelles générations et des traitements en ligne des données multicellulaires recueillies. Le domaine des ICM est clairement interdisciplinaire. Il nécessite une collaboration étroite entre les neurosciences des systèmes, les neurosciences computationnelles, la neuro-robotique, l'automatique et l'ingénierie (par exemple la théorie du contrôle). Enfin, si les aspects médicaux sont assez peu représentés directement dans la section, notons qu'ils soulèvent, chez l'Homme, des questions d'ordre éthique (cf l'Homme augmenté).

4. Quantification du comportement

La mesure quantitative du comportement animal est devenue centrale en neuroscience. La valeur translationnelle des modèles animaux fait l'objet d'un débat permanent (voir section III A) et l'évolution des pratiques d'ana-

lyse des comportements est un moyen de répondre à ces critiques. Que l'objet étudié soit la structure du comportement lui-même, un moyen de révéler les mécanismes neuro-naux ou génétiques sous-jacents *via* des manipulations (génétiques, optogénétiques...), les chercheurs s'intéressent aux descriptions du comportement quantifiables et robustes. On observe une prise en compte de plus en plus importante de la variabilité et de la diversité dans l'expression comportementale qui n'est plus considérée que comme un gène mais une source d'informations importante. La recherche de généralisation à partir de ces variations reste un challenge risqué mais aussi très prometteur.

L'automatisation des procédures d'analyse des comportements apparaît de plus en plus comme une nécessité. Cette automatisation est au départ principalement considérée comme un moyen 1) de contrecarrer les limites inhérentes à la manipulation des animaux et à la présence de l'expérimentateur, 2) d'augmenter le débit des données et 3) d'augmenter la reproductibilité. Elle permet aussi de changer les paradigmes. On peut considérer grossièrement deux approches dans l'étude des comportements. L'une met l'accent sur une expérimentation élaborée en laboratoire avec des tests spécifiques, l'autre sur l'observation détaillée sur le terrain. L'automatisation permet de lier ces deux approches et de faire des descriptions de comportement très détaillées, inspirées de l'éthologie, d'observer comment les animaux résolvent des problèmes complexes. À cette automatisation des protocoles expérimentaux s'ajoute une nécessaire analyse automatique du comportement. De nouveaux outils (camera 3D, machine vision, machine learning) permettent de capturer avec des niveaux de détails de plus en plus importants les déplacements et les trajectoires des animaux. Le détail est ici important dans toutes les analyses sur le mouvement, mais aussi pour déterminer des temps précis (contact, sniffing...) utilisés pour aligner les données électrophysiologiques. De nombreux logiciels en libre accès (DeepLabCut, LabMouseTracker...) permettent une détection fine des mouvements chez des animaux (drosophiles,

C. elegans, rongeurs...) isolés ou en groupe, et sur de longues périodes de temps. Un objectif, et une des difficultés de l'analyse automatique du comportement, est de catégoriser ces trajectoires afin d'obtenir une représentation utile du comportement. En segmentant ces séries chronologiques en comportements distincts, les changements dans la fréquence, la succession ou la manière dont les animaux adoptent certains comportements sont ensuite quantifiés. Cette catégorisation fait, là aussi, appel aux dernières technologies en algorithmes d'apprentissage automatique et en technologie d'analyse de données massives.

C. Les données massives

La quantité de données générées grâce à l'utilisation de ces nouvelles technologies croît exponentiellement. Ces quantités de données nourrissent des idées de partage et d'interdisciplinarité, de standardisation, de traitement par la communauté ou par des algorithmes de machine-learning et enfin de simulation du cerveau humain. Parce que la technologie a révolutionné nos capacités d'enregistrement et d'analyse des activités du cerveau, il est proposé d'ores et déjà d'appliquer les méthodes développées dans les grands programmes de la physique ou du séquençage du génome et se focaliser sur l'acquisition massive et standardisée de données sur le cerveau (électrophysiologiques, imagerie, génomique...). C'est le pari des grands programmes académiques ou privés tel que le Human Brain Project en Europe, les projets « BRAIN initiative », les projets du Allen Institute ou encore les projets d'entreprise de type « Google » qui constituent actuellement de telles bases de données.

Il faut quand même constater que les données en neurosciences ont quelques spécificités. Les données électrophysiologiques, et toutes autres données dynamiques d'activité, sont très dépendantes des contextes et des cadres conceptuels dans lesquels elles ont été obtenues. Il ne faudrait donc pas que pour une

raison de standardisation et de financement, la concentration des données au sein de quelques bases « globalisées » appauvrissent les contextes et cadres conceptuels. Ceci est vrai pour le type d'expérience mais aussi pour les modèles animaux utilisés. Enfin, ces grands projets sont motivés par l'acquisition de données, mais en physique ils alimentent des cadres théoriques clairement définis. Ce n'est pas encore le cas en Neurosciences et cette acquisition de données ne peut se substituer aux recherches menées au sein des grands organismes, qui sont basées sur une exploration large et non exclusive de multiples cadres théoriques.

II. De la notion d'individu à la pathologie

A. Les différences et l'émergence de la problématique de l'individu

Les progrès de la recherche dans les domaines de la régulation épigénétique, la plasticité neuronale et la dynamique des cellules souches, ou encore l'impact de l'environnement sur l'architecture des réseaux amènent à réévaluer comment génomes et environnement interagissent pour définir ce qu'est un individu ou encore expliquer les variations interindividuelles.

1. Le genre

La prise en compte de la dimension de sexe et de genre est indispensable dans les projets de neurosciences fondamentales. Ceci devient un élément d'évaluation dans les appels d'offres. En effet comprendre les multiples façons

dont le dimorphisme sexuel peut modifier la physiologie cérébrale est essentiel pour élaborer des traitements bénéfiques pour tous. Cela est particulièrement vrai dans le domaine de la neuropsychiatrie étant donné que de nombreuses pathologies présentent un biais de genre dans la fréquence, la gravité ou la réponse au traitement. Une interprétation appropriée des relations entre sexe et fonctionnement du cerveau nécessitera toutefois des cadres clairs pour définir ce qui est réellement mesuré et ce que cela signifie, mais la prise de conscience accrue de l'importance de l'inclusion du facteur « sexe » dans la recherche pré-clinique profitera à toute la recherche en neuropsychiatrie.

2. De la variabilité interindividuelle à l'individu

Les variations dans l'expression des génomes et leurs répercussions aux niveaux moléculaires et cellulaires, les mécanismes de plasticité permettent de penser la singularité de chaque individu, c'est à dire la spécificité de chaque individu au sein d'une population homogène. Le lien entre individuation et épigénétique est à même d'apporter une explication scientifique à l'hétérogénéité des réponses comportementales observées chez des animaux modèles dont l'identité génomique ne fait aucun doute. Ainsi, l'environnement social influence l'expression des gènes de façon durable et éventuellement transmissible et apporte une empreinte claire sur l'expression de molécules à l'origine de la plasticité cellulaire. Une question sera de définir si une partie de cette variation interindividuelle est produite en réponse à un besoin adaptatif de l'individu (pour s'adapter à son environnement social un individu développe l'agressivité par exemple) ou si elle est la conséquence de processus sans lien avec une adaptation (accumulation d'effet de l'histoire individuelle qui au final font diverger les individus).

Compte tenu des thématiques de la section, nous nous intéresserons plus avant à la plasticité neuronale et à ses conséquences sur la

biologie de l'animal entier. Ces phénomènes façonnent les interactions entre les individus, leurs perspectives de survie ou encore leur susceptibilité aux maladies : comprendre quels mécanismes permettent de générer deux individus distincts est donc très important. Une des conséquences est que dans le futur, il ne s'agira plus d'étudier uniquement un individu moyen considéré comme « représentatif » de la population mais de comprendre ce qui fait diverger des individus de la norme établie par la moyenne, cette divergence pouvant éventuellement les engager sur la voie d'une résilience ou d'une vulnérabilité à certaines maladies. Après avoir été quelque peu ignorée d'un point de vue expérimental, et par le truchement de la plasticité et/ou l'épigénétique, la question de la variabilité entre individus devient donc une question scientifiquement et expérimentalement traitable. Dans le champ de la santé, l'individu pris sous un angle scientifique ouvre aussi sur la problématique de la « médecine personnalisée ».

De par le pont qu'elles réalisent entre les aspects moléculaires et cellulaires d'une part et le comportement d'autre part, les neurosciences sont donc aux premières loges pour apporter des éléments de réponse à ces questions.

B. Pathologies du SNC et modèles animaux

La compréhension des mécanismes et des causes des maladies du système nerveux central (SNC), autrement dit leur étiologie, constitue un défi majeur pour les neurosciences. Les champs thématiques de la section ne couvrent pas spécifiquement l'étude des maladies chez l'homme, mais leur étiologie dans différents modèles animaux ou cellulaires. Ces études sont aujourd'hui au cœur de très nombreux projets de recherche de la section. Cette tendance 'lourde' trouve certainement son origine dans les appels à projet de type ANR, qui explicitement 'visent à accroître les efforts de recherche sur certaines thématiques pour

répondre aux enjeux scientifiques et sociétaux actuels’.

Les maladies neurologiques sont aujourd’hui aussi classées en fonction de mécanismes ou de substrats biologiques identifiés. Ces classifications évoluent constamment, mais il est intéressant de constater des regroupements fonctionnels qui, sans être exhaustifs, distinguent des causes génétiques, inflammatoires, vasculaires, ou encore immunitaires, à de grandes maladies du SNC. Un nombre croissant de troubles neurologiques et psychiatriques sont regroupés sous les termes génériques de synaptopathies ou encore de maladies à « prion-like ». Ces causes permettent un point d’entrée dans la pathologie et dans la modélisation. Les modèles se focalisent sur un aspect particulier (occlusion d’artères cérébrales, prise d’une drogue, modification de propriété synaptique...) pour en étudier les conséquences à différentes échelles : cellule isolée, groupe de cellules (organoïdes), modélisation de réseaux neuronaux (orientés ; systèmes microfluidiques), ou organisme entier (modèles animaux). Au-delà de ces approches, les neurosciences computationnelles, et en particulier la psychiatrie computationnelle, ont investi le champ de la psychopathologie, avec pour objectifs : 1) articuler des données obtenues à différentes échelles d’organisation, 2) intégrer un niveau de description formelle, sous forme d’opérations, des mécanismes cognitifs, et 3) déterminer les conditions d’émergence des troubles psychiatriques. L’analyse des données permet de lier des éléments précis des modèles (des paramètres libres) à des aspects mesurables du comportement et de l’activité des réseaux neuronaux, ou à des propriétés moléculaires. Ces approches computationnelles se développent en psychiatrie, mais aussi plus largement dans le cadre de l’analyse des fonctions cognitives des animaux.

Le concept de modèle animal est central dans nos pratiques de recherches. Un modèle peut se définir comme un animal modifié (une souris mutante par invalidation d’un gène particulier, par exemple), un animal présentant spontanément les symptômes d’une maladie (crises d’épilepsie, troubles du comportement

social...), ou un animal chez lequel ces symptômes sont induits, par un traitement. Ces modèles permettent d’étudier un processus pathogénique ou de tester des thérapies. Les projets de recherche tendent à organiser des analyses multi-échelles des modèles les plus pertinents, incluant notamment la génomique, l’épigénomique, l’analyse des propriétés cellulaires et des circuits, la dynamique des réseaux, et les comportements. Les grands ensembles de données « omiques » qui fournissent des informations sur les risques génétiques et la physiopathologie moléculaire sont de plus en plus fréquents, ainsi que l’analyse des circuits avec des enregistrements à grande échelle de l’activité des neurones. Enfin, les analyses du comportement, qui restent le point faible de ces approches, sont de plus en plus sophistiquées et effectuées dans des conditions « semi-naturelles », où l’animal est laissé en liberté avec ses congénères. L’objectif de ces approches est de prendre en compte les composantes environnementales ou sociales dans l’émergence des maladies.

Il reste que la validité des modèles animaux dans l’approche des pathologies humaines, particulièrement psychiatriques, est fortement remise en question par les défenseurs de la cause animale. Les principaux arguments sont, d’une part, que les troubles psychiatriques complexes n’ont pas d’équivalent chez les animaux (qu’est-ce qu’une souris autiste ou dépressive?) et, d’autre part, que 90% des molécules efficaces chez les animaux ne le sont pas chez l’Homme. Tout le monde s’accorde à dire que nous ne pouvons pas modéliser complètement des troubles complexes neuropsychiatriques (schizophrénie, dépression...) ou neuro-développementaux chez l’animal. Il existe cependant de nombreux arguments en faveur de la conservation de comportements de base et des mécanismes neuronaux sous-jacents (circuits, types de neurones, molécules) dans le règne animal. On citera, par exemple, les circuits de peur et de sursaut qui sous-tendent le traitement des menaces dans l’environnement, ou les circuits du renforcement et de la motivation. Ces circuits, très bien conservés dans les différentes espèces, ont apporté des informations essentielles pour comprendre

certaines maladies humaines telles que les troubles anxieux ou encore l'addiction. Il y a enfin un consensus sur certains critères et la caractérisation d'endophénotypes qui se sont avérés particulièrement utiles et instructifs. Les modèles animaux restent un de nos meilleurs outils pour tenter de comprendre l'étiologie des maladies et de tester des thérapies. La recherche de stratégies thérapeutiques n'est donc qu'un aspect de l'étude des modèles animaux, qui doivent bénéficier des études plus fondamentales portant sur les mécanismes physiopathologiques communs à l'animal et à l'homme.

III. Nouveaux enjeux dans la pratique des neurosciences

A. Expérimentation animale, enjeux et pratiques

L'expérimentation animale est aujourd'hui au cœur de nombreux débats et l'utilisation de modèles animaux demande à être de plus en plus encadrée, justifiée et anticipée. La pratique des neurosciences ne semble pas encore en mesure de se passer de cette expérimentation. Les méthodes substitutives qui mettent en avant une recherche sans animaux (l'approche computationnelle et des grands programmes type « blue brain project », les organoïdes...) apportent des connaissances sur les mécanismes de base. Pour expliquer les fonctions du cerveau ou comment les individus s'adaptent à leur environnement ces méthodes ne sont pas encore suffisantes. La poursuite de l'expérimentation se place donc encore pour la société dans une problématique risque/bénéfice. Au-delà des questions sur la possibilité et l'objectif d'une recherche sans expérimentation ani-

male, la pratique actuelle de la recherche doit s'adapter, à la fois pour garantir le bien-être des animaux et pour répondre aux évolutions des techniques et analyses en neurosciences.

Les centres de recherche intègrent très souvent des animaleries qui comportent des zones d'élevage, de stabulation et d'expérimentation permettant de réaliser des études sur les modèles animaux élevés à proximité. Dans leur conception, ces animaleries sont de véritables centres d'exploration fonctionnelle proposant de multiples techniques d'investigations. L'organisation en plateforme permet de mutualiser les services et le matériel, d'optimiser l'utilisation des postes et des pièces grâce à l'utilisation de tests « standardisés ». Cette organisation facilite l'application de bonnes pratiques, tout autant éthiques que scientifiques. Elle est en revanche souvent peu adaptée aux recherches nécessitant de développer de nouvelles méthodologies ou de réaliser un suivi longitudinal des animaux sur de longues périodes, comme c'est le cas avec les nouvelles approches intégrées des bases neurales du comportement. Les études longitudinales sont compliquées par l'impossibilité de sortir et de rentrer des animaux. Il est donc, à moins de revenir à des stabulations locales dans les laboratoires, nécessaire de réserver des espaces de travail en animalerie dédiés à ce type de recherches.

Enfin, les procédures liées à la réglementation pour l'expérimentation animale (dépôt des dossiers, niveau d'expérimentation, expérimentation des étudiants...) posent problème. Cette réglementation est censée assurer de bonnes pratiques expérimentales et garantir le bien-être des animaux. Elle se traduit cependant aussi par une augmentation importante des procédures administratives avec des complexités et des incohérences qui pénalisent la recherche. La circulation entre centres de recherche des modèles animaux (souris mutantes...), très importante pour assurer des collaborations, est très difficile (problèmes sanitaires, réglementation...) et coûteuse. La protection du bien-être animale est essentielle, néanmoins la lourdeur administrative des processus d'autorisation ne semble pas corrélée avec ce besoin. Cette constatation n'est mal-

heureusement pas spécifique à l'expérimentation animale. Ce problème s'ajoute à un ensemble de processus administratifs (gestion de projets et des financements, autorisation OGM, expérimentations...) qui laisse de manière générale de moins en moins de temps et de place à l'expérimentation dans la recherche.

B. Interdisciplinarité et neuroscience

L'interdisciplinarité fait partie intégrante du champ des neurosciences. Par interdisciplinarité on désigne le recours à des compétences développées, *a priori* hors du champ classique des neurosciences, pour répondre aux questions posées en neurosciences. Cette interdisciplinarité peut avoir un aspect méthodologique ; dans ce cas il s'agit d'utiliser des outils ou des méthodes classiquement utilisées, ou développées, dans d'autres disciplines (par exemple en optique, chimie, informatique...). Il peut également s'agir d'emprunter des concepts à d'autres disciplines (mathématiques ou encore sciences sociales) et dans ce cas on peut parler d'interdisciplinarités théoriques.

Les neurosciences se caractérisent par le fait que ce domaine absorbe et intègre rapidement les concepts et techniques venant d'autres disciplines. La difficulté du discours est que les limites de l'interdisciplinarité restent floues et évoluent en fait très rapidement. Les neurosciences computationnelles ne forment ainsi plus nécessairement une discipline à part des neurosciences. Dans la pratique, de très nombreux scientifiques, dont le domaine d'exercice est la neurobiologie, développent des approches interdisciplinaires à l'interface avec d'autres sections de l'INSB (dont les sections 26, 28, 22 et 24) ou dans les champs de l'analyse et de la gestion de données, de la modélisation mathématique, de la physique, de la chimie, ou enfin des sciences sociales, domaines qui relèvent traditionnellement d'autres instituts du CNRS (INC, INP, INSIS, SHS). En plus du recru-

tement direct de chercheurs ayant des profils interdisciplinaires (hors du recrutement en CID), on constate des changements d'affiliations de chercheurs initialement affiliés à des sections de physique, d'optique... qui rejoignent la section 25 et viennent enrichir les profils et compétences de la communauté.

Les équipes de recherche en neuroscience, pour avancer dans leurs projets, s'appuient de plus sur des collaborations. Ceci est en partie dû au fait i) que l'ensemble des techniques nécessaires à la réalisation d'un projet est de plus en plus important, ii) que les équipes n'ont pas toujours localement les compétences et enfin iii) que l'organisation de la recherche en réseaux cofinancés (ANRs...) favorise cette tendance. Collaboration et interdisciplinarité ne sont pas synonymes, mais ces couplages entre collaborations et compétences multidisciplinaires sont extrêmement importants et assurent la vitalité du domaine ainsi qu'un assez bon recouvrement des techniques et des thématiques. Il faut cependant absolument leur associer un recrutement en neurosciences de chercheurs avec des profils multi ou interdisciplinaires et d'ingénieurs plus spécialisés pour continuer à faire évoluer le domaine. Le faible nombre de postes ouverts en neuroscience est forcément une limite à ce recrutement de profils variés.

Au-delà de ces collaborations qui se développent de manière « bottom-up », bon nombre d'organisations qui gèrent la recherche considèrent les environnements multidisciplinaires comme essentiels pour favoriser les collaborations entre chercheurs de différentes disciplines. Il peut s'agir de regrouper sur un même lieu des équipes venant de différentes disciplines (par exemple le CIRB au collège de France). De manière moins contraignante et plus facile à mettre en jeu, de nombreux programmes de recherche visent à promouvoir cette interdisciplinarité en s'appuyant sur des co-directions ou des collaborations entre des disciplines et des chercheurs d'instituts différents : chimie-bio, physique-neuro, informatique-neuro, math-neuro... Ces financements sont fréquemment de courte durée, de type « amorçage » et il est souvent difficile de soute-

nir dans la durée des travaux de recherche de ce type. Des recrutements spécifiques sont effectués au niveau des CID (par exemple CID 51 Modélisation, et analyse des données et des systèmes biologiques). La promotion de cette interdisciplinarité « organisée par les institutions » doit être soutenue. Cependant, ces recrutements et les contours de ces programmes interdisciplinaires doivent évoluer en permanence pour rester en pointe de l'interdisciplinarité et ne pas se faire au dépend des recrutements pluridisciplinaires au sein des neurosciences.

Enfin, au-delà de ce travail entre différentes disciplines et échanges entre chercheurs, l'ingénierie est un élément crucial de la pratique de l'interdisciplinarité. Il est très souvent nécessaire de déployer des techniques qui ne sont pas nécessairement des sujets de recherche en soi (par exemple les nouvelles techniques de machine learning, des techniques d'imageries...). Le manque cruel d'ingénieur(e)s dans les laboratoires de neurosciences limite l'application et le déploiement de méthodes spécifiques dans les équipes de neurosciences. Enfin, notons que l'absence d'ingénierie de base avec des ateliers de micro-fabrication, mettant entre autres à disposition des imprimantes 3D, des dispositifs électroniques, etc., ralentit fortement l'implémentation de ces technologies.

C. les ITAs

Les ITAs forment, au même titre que les chercheurs, une composante incontournable de la recherche. Ils permettent, au travers de l'acquisition des données, les développements techniques et la gestion des unités, l'avancée des connaissances et le bon fonctionnement des laboratoires. Ces ITAs ont vu leurs tâches augmentées du fait d'une technicité de plus en plus poussée, d'une complexification des contraintes administratives et de l'élargissement de leur champ d'action, mais aussi d'une baisse des effectifs. Le rapport de la mandature 2000-2004 indiquait déjà que « la crise de la recherche [tenait] pour une part à la crise du

personnel ITA » mais depuis rien ne semble avoir évolué dans le bon sens.

La généralisation des plateformes techniques a permis d'amortir en partie la pénurie d'ITAs en mutualisant les personnels et compétences. En contrepartie, le nombre d'ITAs affectés au sein des équipes pour des travaux de routine indispensables (animalerie, instrumentation, etc.), ou pour des travaux spécialisés, a baissé drastiquement. Ces postes ont été compensés par le recours à des agents contractuels ou à des prestataires de services, avec pour résultat une baisse d'efficacité due à l'investissement sans cesse renouvelé pour la formation de ces personnels temporaires. Le non-renouvellement des postes pérennes entraîne aussi une perte massive des savoir-faire au sein des équipes et des problèmes de suivi des travaux de recherche aboutissant finalement, à plus ou moins long terme, à la disparition d'agents formés et intégrés. Cette stratégie, si elle économise de la masse salariale, ampute les moyens financiers déjà limités des unités et induit une impossibilité de planification des ressources humaines à long terme compte tenu du caractère aléatoire de ces ressources. Un effort doit rapidement être fait pour inverser cette tendance qui nuit au bon fonctionnement à long terme des structures de recherche. Enfin, la question des évolutions de carrières et des rémunérations reste un sujet d'inquiétude important.

L'internationalisation de la recherche et la gestion de contrats multi-sites au niveau européen impliquent la connaissance de lois et d'outils en constante évolution qui impose des formations particulières pour le personnel administratif. Le développement accéléré d'outils d'imagerie, de biologie moléculaire, de tri cellulaire (jusqu'à la cellule unique) et d'acquisition de données à haut débit (NGS, IRM, électrophysiologie...) ou des techniques d'analyse des données (machine learning Big data) nécessite des remises à niveau constantes. Des plans de formation clairement ciblés doivent être mis en place pour permettre une adaptation à l'évolution continue des métiers.

Conclusion

Rappelons que la recherche fondamentale en neuroscience constitue le socle de pratique de la section 25. La compréhension des mécanismes de la communication neuronale, les interactions avec les cellules gliales, la dynamique des circuits nerveux en lien avec le comportement et les processus neurophysiologiques normaux et pathologiques constituent le cœur de ses préoccupations. Le programme des neurosciences est devenu de plus en plus intégratif et, de par ses relations avec le comportement, la vie mentale, les émotions et la cognition, il sort très fréquemment du cadre restreint de la biologie et pénètre allégrement le secteur des sciences de l'homme, de l'éco-

nomie et de la société. Aujourd'hui il faut bien constater que ce programme attise les curiosités, fascine, suscite des espoirs tout autant qu'il peut déclencher le rejet et des critiques quand les neurosciences se proposent d'améliorer nos performances intellectuelles, de réparer nos troubles mentaux ou encore se mêle de droit et d'éducation. Les neurosciences sont un domaine de recherche transdisciplinaire qui tient certainement une place à part en biologie. Les progrès réalisés dans le domaine sont certains et méritent d'être soutenus, non seulement par une politique de financement à la hauteur des enjeux mais aussi et surtout en ce moment par une politique de recrutement (chercheurs et ingénieurs) qui permettent de maintenir une pluridisciplinarité indispensable à son développement.

ANNEXE 1

En complément de ce rapport il est conseillé de consulter l'ouvrage « Le Cerveau en Lumière » aux éditions Odile Jacob édité à l'initiative de l'ITMO Neurosciences, Sciences Cognitives, Neu-

rologie, Psychiatrie (Dir B. Poulain et E. Hirsh) de l'Alliance Nationale pour les Sciences de la Vie et de la Santé (AVIESAN).

SECTION 26

CERVEAU, COGNITION, COMPORTEMENT

Composition de la section

Pascal BARONE (président de section), Delphine PINS (secrétaire scientifique), Christine ASSAIANTE, Grégoire BORST, Cédric BOUQUET, Séverine CASALIS, Frédéric CHAVANE, Anne DIDIER, André DIDIERJEAN, Audrey DUSSUTOUR, Christine ENSUQUE, Nathalie GEORGE, Rafael LABOISSIERE, Denis LANCELIN, Christelle LEMOINE-LARDENNOIS, Sophie LUMINEAU, Chantal MATHIS, Jean-Christophe SANDOZ, Leila SELIMBEGOVIC, Catherine SEMAL, Angela SIRIGU.

Résumé

La section 26 couvre un ensemble large de disciplines dont les interactions fortes visent à la compréhension des fonctions intégratives et cognitives, supports des comportements individuels ou collectifs, qui eux-mêmes sont le reflet des processus d'interactions avec l'environnement physique et social. Au sein de la section 26 ces approches forment un continuum décloisonné incluant de façon imbriquée l'éthologie, la psychologie et les neurosciences intégratives et computationnelles.

le milieu environnant, il est crucial que les différentes disciplines que sont l'éthologie, la psychologie et les neurosciences se nourrissent mutuellement et la section 26 restera vigilante à ce que cette pluridisciplinarité soit maintenue. Cette pluridisciplinarité permet de relier la compréhension de l'organisation structurale multi-échelle du système nerveux central et le décryptage du code neural aux grandes fonctions que sont la perception, la motricité, l'attention, les processus de mémoire et d'apprentissage, le traitement des émotions, la prise de décision, le raisonnement, le langage... Ces fonctions sont abordées dans leur dimension normale ou pathologique, et dans une perspective vie entière, depuis le développement précoce, jusqu'aux processus de vieillissement.

Introduction

Afin de mieux appréhender les processus cognitifs qui sous-tendent les interactions avec

La pluridisciplinarité de la section 26 se concrétise à travers son rattachement multi-instituts, à l'INSB en principal et à l'INSHS en secondaire. Outre le lien historique des labo-

ratoires de psychologie avec les sciences humaines, l'implication de l'INSHS dans la section 26 trouve sa justification dans des thématiques abordées dans les unités de la section qui s'inscrivent clairement à l'interface des sciences humaines et biologiques (éducation, communication, handicap...) et basées sur des approches expérimentales. Ainsi la section 26, qui intègre tous les aspects, de la psychophysique à la psychologie sociale et la philosophie cognitive, en passant par l'étude du comportement animal et l'éthologie humaine, légitime parfaitement sa place naturelle d'interface entre sciences biologiques et sciences humaines.

De par la diversité des disciplines, des objets d'étude et approches couvertes, la section 26 présente des objectifs en partie communs avec plusieurs sections d'Instituts différents. Tout d'abord, un recouvrement naturel existe avec la section 25 de l'INSB (Neurobiologie moléculaire et cellulaire, neurophysiologie). Les avancées dans le développement d'outils issus de la génétique ont permis de développer des approches génomiques des bases du comportement, rejoignant ainsi certains aspects spécifiques de la section 25. Cela peut s'exprimer au travers des modèles transgéniques et des méthodes optogénétiques permettant d'inactiver des circuits fonctionnels spécifiques (rongeur et primate non humain) ou d'études des processus de régulation épigénétique des comportements.

La section 26 partage également des intérêts communs avec la section 34 (Sciences du Langage) dans les domaines de la psycholinguistique. Cette discipline, qui vise à comprendre les mécanismes de production et de compréhension du langage, a évolué fortement vers une approche expérimentale mais également clinique, intégrant les processus cognitifs et sociaux communs aux 2 sections.

La section 26 est représentée au sein de la CID 51 (Modélisation, et analyse des données et des systèmes biologiques). Les approches multi-échelles et la collecte d'une grande masse de données ont débouché sur la nécessité d'établir des modèles théoriques et statistiques de la complexité du système nerveux

central et des comportements, et une partie des neurosciences computationnelles couvertes par la section 26 s'intègre parfaitement dans l'interface que constitue la CID51 entre la biologie, les mathématiques, l'informatique, la physique et la chimie.

La section présente aussi des liens avec les thématiques de la section 29 (Biodiversité, évolution et adaptations biologiques) centrées sur l'étude des processus d'adaptation et d'évolution des comportements de l'organisme en interaction avec l'environnement. L'identification des mécanismes sous-jacents intègre logiquement des approches de biologie comportementale, de neurobiologie et de sciences sociales.

Enfin des ponts évidents relient la section 26 à la section 7 (Sciences de l'information) de l'INS2I, notamment autour des interactions homme-machine et de la robotique. Ces liens touchent aussi tous les champs d'application du traitement du signal et des images aux neurosciences intégratives, dans le cadre de l'étude de la connectivité et de la dynamique cérébrale conduisant à une approche multimodale de l'imagerie du cerveau.

Un total de 23 laboratoires sont rattachés à la section 26 en principal, dont 2 sont des laboratoires INSHS, et 8 en secondaire, dont 3 sont INSHS et 2 INEE. À cela s'ajoutent 5 GDR, 6 IFR et 10 UMS en rattachement primaire ou secondaire. La section comprend un volant de 330 chercheurs environ, répartis pour près des 2/3 dans des laboratoires ayant la section 26 en rattachement principal. Ainsi la présence de près de 30 % de ses chercheurs dans des laboratoires hors section 26 est une preuve supplémentaire de la pluridisciplinarité de la section 26. La répartition globale homme-femme est de 61-39%, mais celle-ci dépend du grade puisqu'elle passe à un rapport de 68-32% lorsque l'on considère les chercheurs ayant le grade de DR où seuls 20% des DRCE sont des femmes. La section reconnaît que depuis plusieurs années, la proportion de femmes candidates aux promotions à un grade supérieur reste inférieure à celle des femmes en position d'être promues. Ces chiffres soulignent la nécessité de mettre en place

une politique d'incitation des femmes à candidater aux promotions de grade et de façon générale à accéder de façon plus importante aux postes de responsabilités (responsabilité d'équipes, direction d'axes, de laboratoire...) et d'éliminer tout aspect genré de nos critères d'évaluation.

Le recrutement au sein de la section 26 résulte d'une contribution des deux instituts de rattachement, l'INSB et l'INSHS. Cette double appartenance est relativement récente (depuis 2012) et elle permet difficilement de maintenir une pluridisciplinarité de recrutement au regard d'une diminution de 40% du nombre de postes en 5 ans. Ainsi le nombre de postes attribués à la section reste nettement insuffisant au regard d'un fort taux de pression (5-7%) qui reflète à la fois la dynamique de la recherche couverte par la section et son caractère multidisciplinaire. Sur les 5 dernières années (2015-2019), la section a recruté 36 chercheurs au grade de chargé de recherche, dont un peu moins de 28% sur des supports apportés par l'INSHS, ce qui se rapproche de la représentativité des laboratoires au sein de la section en termes de rattachement à cet institut. La section a pratiquement atteint une parité de recrutement avec une proportion de 47,5% de femmes lauréates des concours. De plus, la section a su maintenir un équilibre entre les différentes disciplines couvertes, tout en respectant les critères d'excellence. Bien que les différentes disciplines représentées par la section ne soient pas cloisonnées, on peut noter que 14% des recrutements s'inscrivaient en éthologie/neuro-éthologie, 25% en neurosciences intégratives sur modèles animaux, 19% en neurosciences cognitives chez l'homme, le reste se répartissant à parts égales (14%) entre psychologie de la perception, psychologie du développement et psychologie sociale/cognitive au sens large. Historiquement, les postes INSB sont des postes « blancs », ce qui a permis d'assurer la diversité des recrutements au sein des différentes disciplines de la section, tout en maintenant une politique de recrutement fondée sur des critères d'excellence scientifique. De plus, depuis 2012 et le co-pilotage de la section, l'INSHS soutient la psychologie expérimentale

en apportant des postes coloriés qui renforcent les recrutements dans ses laboratoires d'appartenance selon la politique scientifique de l'Institut et en s'appuyant sur les critères de la section. Ces coloriations sont généralement discutés afin de s'assurer de l'existence d'un vivier suffisant et d'excellence au sein de la communauté sur les axes scientifiques que souhaite soutenir l'Institut. Ainsi, sur ces coloriations, les taux de pression étaient similaires à ceux observés pour les postes non coloriés de l'INSB, ce qui atteste d'un potentiel fort de chercheurs dans ces disciplines. Nous avons ainsi pu recruter sur plusieurs vagues des chercheurs de qualité dans les domaines tels que Développement et Apprentissage, Langage et Cognition, Cognition sociale. Par contre, la thématique associant Art & Cognition, bien que soutenue par la section et les Instituts au travers du GDR Esthétique Arts & Sciences (ESARS), n'a pas montré sur plusieurs vagues un vivier suffisant pour pouvoir être soutenue. Au global, la section reconnaît le rôle important de ces coloriations dans la structuration des laboratoires associés INSB/ISHS, en renforçant le continuum qu'il existe entre la Psychologie, les Neurosciences intégratives et l'Éthologie.

I. Éthologie

L'éthologie est la science dont l'objet d'étude central est le comportement animal y compris humain. L'éthologiste étudie le comportement en répondant à des objectifs complémentaires : identifier ses déterminants internes (génétiques, physiologiques, neurobiologiques) et externes (environnementaux abiotiques ou biotiques), et ses fonctions dans le cadre de l'interaction animal-milieu. Il détermine aussi les mécanismes impliqués dans le développement comportemental (comme les effets d'expérience ou d'apprentissage), ou dans l'émergence des stratégies comportementales au niveau des espèces par une approche comparative interspécifique. L'éthologie se situe donc à l'interface d'autres

disciplines pour former des champs disciplinaires variés tels que la neuroéthologie, l'écoéthologie, l'éthologie cognitive, l'éthologie sociale... De plus, les chercheurs ont intégré les concepts et méthodes de l'éthologie à l'étude du comportement humain, en étroite collaboration avec les psychologues. Ainsi, l'éthologie humaine est maintenant reconnue et en forte expansion depuis ces dernières années. En France, l'éthologie est organisée au travers de différentes structures dont la société française d'étude du comportement animal (SFECA) qui a pour objectif de promouvoir les recherches dans le domaine de la biologie du comportement et la diffusion de la discipline et le GDR-Éthologie (2004-2015) qui a permis l'émergence de collaborations de recherche et de formation.

A. Faits marquants et enjeux sociétaux de l'éthologie

Une meilleure connaissance des comportements animaux implique des retombées sociétales majeures. En effet, depuis 2015, l'animal est considéré comme un être vivant doué de sensibilité (loi n° 2015-177), les recherches doivent continuer pour clairement identifier les émotions, les états mentaux et les processus cognitifs qui peuvent être exprimés par les animaux. Ces éléments scientifiques contribueront au vaste débat sociétal sur la conscience animale, et permettront de tout mettre en œuvre pour améliorer le bien-être des animaux de compagnie, de loisir, ou maintenus en captivité pour l'élevage, la recherche ou la conservation des espèces. En ce qui concerne ce dernier point, les recherches éthologiques sont aussi essentielles pour améliorer les connaissances des espèces en danger suite à la disparition/dégradation des habitats ou aux changements climatiques du fait des activités humaines. Il faut noter qu'il est urgent d'identifier les causes du déclin des espèces (des abeilles et des oiseaux par exemple), et trouver des solutions pérennes. Également les recherches en éthologie permettent d'optimiser les

actions de réintroduction car trop souvent les individus relâchés s'avèrent maladaptés aux conditions naturelles et présentent des taux de survie et une participation à la reproduction *in natura* trop faibles. L'éthologie présente des applications directes en santé humaine au travers de l'étude des processus cognitifs et émotionnels de modèles animaux mais aussi car l'éthologie permet de développer de nouvelles thérapies par médiation animale (autisme...). L'éthologie humaine cherche notamment à comprendre le comportement des nouveau-nés et leur perception du milieu, pour développer des protocoles afin d'améliorer leur bien-être en contexte médicalisé en cas de prématurité. Enfin, l'éthologie humaine s'intéresse à décrire les mécanismes collectifs dans le cadre des déplacements de foule. En combinant observations en milieu naturel, expérimentations contrôlées et modélisation mathématique, les chercheurs ont pu caractériser les dynamiques collectives qui animent les foules et permettre ainsi de prédire l'efficacité des infrastructures face aux paniques collectives.

1. Bases cérébrales des comportements animaux

La neuroéthologie cherche à identifier les bases nerveuses des comportements naturels des animaux, dans un contexte multidisciplinaire alliant des approches éthologiques et neurobiologiques mais faisant également appel à des concepts issus de l'écologie et des sciences de l'évolution. La neuroéthologie s'inspire de la diversité biologique et se concentre sur le comportement naturel de l'animal et sur les adaptations de ses systèmes perceptuels, intégrateurs et moteurs à son environnement. Cette discipline découle logiquement de l'éthologie, qui par la diversité des espèces qu'elle étudie et des milieux naturels qu'elle explore, permet de découvrir des compétences comportementales et/ou cognitives qui resteraient insoupçonnées si l'on se concentrait uniquement sur les modèles expérimentaux classiques. La neuroéthologie réserve une place importante à l'étude des pro-

cessus sensoriels, de l'apprentissage et de la mémoire, de la navigation et de la communication sociale. Ces études utilisent une large gamme de modèles vertébrés (oiseaux chanteurs, moutons, lapins, rongeurs, primates non-humains) et invertébrés (seiches, abeilles, fourmis, mouches). Des travaux fondateurs en neuroéthologie ont par exemple décrit les mécanismes nerveux sous-tendant la perception spatiale des sons chez la chouette effraie, l'écholocation chez les chauves-souris ou la navigation chez le papillon migrateur monarque. Chez certains modèles, comme la mouche drosophile, l'approche neuroéthologique s'est très fortement développée ces dernières années, de sorte que les chercheurs s'inspirent de plus en plus des comportements naturels de ces animaux dans leur milieu. Cette tendance forte, alliée aux très puissants outils de neurogénétique existant chez cette espèce ont permis de réaliser des progrès majeurs et de disséquer très précisément les circuits et processus de modulation physiologique et de plasticité sous-tendant les comportements naturels de ces mouches. Expérimentalement, la neuroéthologie combine des recherches sur le comportement en milieu naturel avec des investigations en laboratoire, employant diverses techniques comme des mesures automatisées de réponses comportementales (analyses vidéo de mouvements, compensateurs de locomotion) et des enregistrements électrophysiologiques (extra- et intracellulaire, patch-clamp) ou en imagerie fonctionnelle (calcique par exemple) en réponse à des stimuli artificiels mimant les stimuli naturels de ces animaux (incluant la réalité virtuelle), alliés à des marquages neuroanatomiques, des stimulations pharmacologiques, etc. Actuellement la neuroéthologie vit une révolution avec l'avènement des techniques d'édition du génome et les outils génétiques permettant d'inhiber ou activer artificiellement des voies neuronales données chez des espèces autres que les modèles neurogénétiques établis (souris, poisson zèbre ou drosophile). Ces nouveaux outils devraient permettre un essor important de la neuroéthologie dans les années qui viennent.

2. Cognition et Émotion

L'éthologie cognitive explore depuis plusieurs années comment les animaux perçoivent, traitent et répondent aux informations environnementales. Les dernières découvertes chez les espèces non vertébrées ouvrent des perspectives nouvelles. En effet, les chercheurs ont montré que les insectes sociaux sont capables de maîtriser des concepts abstraits, comme la notion de quantité (y compris le concept du zéro), et de transmettre de l'information socialement. De plus, les céphalopodes maîtrisent la notion du temps et d'espace, donc présentent des mémoires quasi-épisodiques. Même des organismes unicellulaires, les myxomycètes, ont montré des capacités d'apprentissage élémentaire alors même qu'ils n'ont pas de structure neurale.

Les liens entre émotion et cognition sont de plus en plus explorés avec une démarche éthologique. En particulier, l'accumulation d'émotions négatives (suite à un stress chronique par exemple) peut induire un état affectif dit « pessimiste » qui conduit l'animal à évaluer négativement toute situation. Récemment de tels biais cognitifs ont été démontrés chez les mammifères (ovins, chevaux, primates non humains), les oiseaux (canaris), chez les poissons (cichlidés) et récemment chez les arthropodes (fourmis, abeilles). Aujourd'hui, l'étude des émotions positives, longtemps négligées, est en pleine émergence, avec l'identification d'indicateurs posturaux, comportementaux et morphologiques chez les mammifères (chevaux) comme chez les oiseaux (cailles, perroquets). Il convient maintenant d'engager des travaux sur la caractérisation des émotions positives, l'identification des contextes inducteurs et leurs conséquences sur le comportement et capacités cognitives, pour améliorer le bien-être et comprendre leurs impacts sur l'adaptation des animaux à leur milieu naturel.

Mieux comprendre la vie sociale et ses adaptations reste une des préoccupations majeures des éthologistes, compte tenu de la diversité des espèces et des modes de vie sociaux. Des travaux sur les grands mammifères, en particulier, ont montré que la coordi-

nation des activités et des déplacements de groupe fait émerger des règles de décision collective (impliquant notamment des mécanismes d'imitation), qui peuvent s'apparenter à une forme d'intelligence collective. Ces mêmes questionnements se posent aussi actuellement concernant les déplacements des foules chez l'humain, en prenant bien en compte les caractéristiques comportementales des individus qui composent le groupe.

3. Communication et échange d'informations

L'échange d'informations au sein des groupes sociaux reste encore une énigme à résoudre pour comprendre les mécanismes de transmissions culturelles. Les travaux visant à décrypter les mécanismes régulant les interactions et relations sociales, initiés depuis de nombreuses années ont permis de nouvelles avancées dans les signaux de communication.

Tout d'abord, les mécanismes perceptifs et fonctionnels de la communication chimique ont été étudiés chez les arthropodes (insectes sociaux, araignées) mais aussi chez des espèces modèles mammifères (rongeurs, lapins, ovins, caprins, canidés, pinnipèdes) pour la régulation des relations sociales, sexuelles, parentales ou interspécifiques. Chez l'homme, alors que les signaux chimiques ont longtemps été considérés comme inefficaces, relayant l'olfaction au niveau de sensorialité archaïque, il est maintenant bien établi que les odeurs sont impliquées dans la régulation des relations parents-bébé, et des travaux novateurs émergent pour comprendre leurs rôles dans la communication intersexuelle. En ce qui concerne la communication gestuelle, les chercheurs ont récemment montré que les animaux invertébrés (céphalopodes ou araignées) ou vertébrés (oiseaux, dauphins, chevaux, primates non humains et humains) présentent des comportements latéralisés lors de la perception ou production d'informations. Latéralité et socialité seraient donc étroitement liées, et des travaux sont nécessaires pour tester la théorie d'alignement populationnel de latéralité chez les espèces sociales.

Enfin, chez de nombreuses espèces, la communication se fait sur la base de signaux acoustiques, en particulier chez les oiseaux et les mammifères. Chez plusieurs espèces, il a été montré que les vocalisations pouvaient coder des informations relevant de l'individu (pinnipèdes, primates non humains), du degré d'apparement (primates non humains), ou encore des performances sexuelles (chevaux). Les règles de communication ont évolué avec la complexification des structures sociales (oiseaux, primates non humains). De plus, les chercheurs ont trouvé que certains primates non humains (babouins) produisaient des sons comparables aux voyelles du langage, sans que la position haute de leur larynx ne les contraigne. De même, les vocalisations des singes ont montré une plasticité acoustique, alors que ces espèces sont considérées comme non apprenantes (cercopitèques). Ces mêmes questions font aujourd'hui aussi débat chez les oiseaux dits non chanteurs dont on découvre actuellement qu'ils produisent des cris plastiques sous l'influence environnementale. Certaines espèces de primates et d'oiseaux peuvent combiner des sons pour produire des messages complexes selon des règles syntaxiques de base. Ces éléments laissent bien penser que les primates non humains ont un système de communication acoustique qui serait un précurseur du langage chez l'homme. Enfin, l'éthologie humaine s'attache aussi depuis plusieurs années à aborder les mêmes questions pour étudier les vocalisations des bébés et le développement langagier des enfants. De récents travaux ont montré que les pleurs des bébés étaient évalués différemment par les adultes, avec un biais sexué, et que le développement du langage était sous l'influence du sexe de l'enfant et du discours du parent, ces facteurs impactant différemment le développement langagier selon le milieu socio-économique. Un champ d'études s'attache aussi à comprendre comment les bébés perçoivent le langage et intègrent les règles de conversations. Ces travaux extrêmement originaux sont possibles grâce aux rapprochements conceptuels et à la mutualisation des méthodes entre l'éthologie,

la psychologie du développement et la sociolinguistique.

4. Plasticité comportementale, épigénèse, adaptation

Depuis plusieurs années, la pensée des biologistes est en pleine révolution scientifique quant aux mécanismes explicatifs des processus évolutifs. En effet, la variabilité phénotypique, principale source de l'évolution, ne s'explique pas seulement par des transmissions génétiques mais bien aussi par des mécanismes non génétiques. Il y a donc une réémergence des théories de l'épigénèse, révélant l'importance de l'environnement sur le développement comportemental. La transmission transgénérationnelle des comportements implique soit des modifications épigénétiques, soit des processus d'influence ou d'apprentissage social. Cette transmission sociale peut s'effectuer de manière horizontale, comme entre congénères du même groupe, ou verticalement de parents à descendants. Ainsi, les chercheurs ont identifié des styles de maternage chez les oiseaux, analogues à ceux connus jusqu'alors chez les mammifères, qui ont des conséquences sur la mise en place de la personnalité des jeunes adoptés en termes de comportement anti-prédateur, de capacités cognitives spatiales ou de compétences sociales. Les styles maternels ont même permis la transmission sociale de ces traits comportementaux. Une telle transmission non génétique s'est même vérifiée chez les drosophiles qui sont capables de transmettre leurs préférences sexuelles (en termes de choix de partenaire sexuel) à leurs congénères uniquement par l'expérience.

Les mécanismes de transmission non génétique intergénérationnelle sont des sujets de recherche à l'heure actuelle en pleine émergence, car d'une part identifier des marqueurs épigénétiques est un défi technique important, et d'autre part comprendre des processus évolutifs à courte échelle temporelle permettra de mieux identifier les processus adaptatifs des animaux en environnement changeant. Les tra-

vaux ont d'ailleurs montré qu'un stress vécu lors de la vie prénatale, ou postnatale, avait des conséquences à long terme sur la mise en place des comportements adultes chez les rongeurs, les oiseaux mais aussi des modèles peu communs comme les céphalopodes. Le stress prénatal a même eu un impact sur la personnalité des descendants de première et la seconde génération chez les oiseaux. À l'heure actuelle, les travaux sur les transmissions culturelles doivent continuer et les marqueurs épigénétiques sous-jacents doivent être identifiés, ainsi que des processus comportementaux qui pourraient remédier à des déficits comportementaux en vie postnatale.

Les interactions animal – milieu sont de plus en plus explorées pour mieux comprendre les mécanismes d'expression et d'adaptation des comportements naturels. Dans ce contexte, il a notamment été montré l'importance des odeurs environnementales sur les comportements sociaux chez les insectes, des facteurs nutritionnels sur les capacités cognitives et la longévité chez les primates. Enfin, les interactions microbiote et comportement ont été une grande découverte ces dernières années. Les chercheurs ont notamment montré que des oiseaux privés de microbiote étaient moins adaptés aux conditions de vie naturelle, car trop peu réactifs et moins tolérants socialement. La flore intestinale s'avère donc avoir un impact sur le bien-être animal et sur l'adaptation au milieu.

5. Modélisation des phénomènes comportementaux

L'éthologie computationnelle a émergé suite au besoin de comprendre les dynamiques complexes qui lie les unités d'un groupe d'animaux. En effet, l'étude des comportements collectifs nécessite une approche combinant étroitement expérience et modélisation et s'appuie sur les outils et méthodes des sciences de la complexité. Toutefois, les biologistes se sont longtemps heurtés à la difficulté d'acquisition de quantité de données suffisantes pour valider les modèles développés en collaboration avec

les physiciens et les mathématiciens. Mais depuis peu, de nombreuses avancées dans ce domaine ont été faites grâce à des approches computationnelles (Machine learning, Deep learning, Machine Vision, Supervised Learning...). L'analyse automatique du comportement a permis d'augmenter non seulement la dimensionnalité du comportement mais aussi sa précision, sa cohérence, son objectivité (analyse en aveugle), et peut-être le plus important : le débit expérimental. L'analyse automatisée offre une profondeur, une portée, une rigueur de conception expérimentale et statistique. Elle permet à plus d'hypothèses d'être testées, à davantage de variables d'être explorées et autorise plus de contrôles. L'analyse automatisée facilite les expériences en boucle fermée. Par exemple, le suivi automatisé basé sur la vision artificielle (Machine Vision) d'animaux en libre mouvement offre un avantage de taille : l'analyse du comportement en temps réel. Cela a par exemple permis de comprendre comment se coordonnent les humains au sein d'une foule ou les poissons au sein d'un banc. Le tracking automatique tel que développé chez l'insecte, permet également de mesurer en ligne la position de l'animal, sa vitesse ou d'autres statistiques comportementales que l'on souhaiterait réintroduire dans un système afin de contrôler l'activité neuronale ou de modifier l'environnement afin de tester des hypothèses précises. Au-delà de la quantification de comportements précédemment identifiés, la pratique actuelle consiste à observer un comportement, puis à développer une méthode qui permet de détecter automatiquement le même comportement en accord avec l'observateur humain. L'éthologie computationnelle offre maintenant la possibilité de découvrir de nouveaux comportements et pourrait bientôt nous permettre de décrire et de mesurer, automatiquement, le répertoire comportemental complet d'un animal, diversifiant ainsi les opportunités de nouveaux axes de recherche. Cela permettrait aux chercheurs de corrélérer de nombreux aspects du comportement aux manipulations génétiques, pharmacologiques et neurophysiologiques, plutôt que de préjuger quels aspects du comportement devrait être mesuré. L'éthologie entre

elle aussi dans l'aire du big data et le défi à venir sera alors de définir comment analyser la pertinence des données générées.

B. Domaines en régression et craintes pour l'éthologie

Ces dernières années, plusieurs grands domaines d'études en éthologie sont en régression. Tout d'abord, les études comportementales les moins intégratives, axées sur la description du comportement animal et sa variabilité sont peu valorisées, alors qu'elles restent un préalable inévitable à toutes études éthologiques, et qu'il est bien établi maintenant que la variabilité individuelle, trop souvent négligée, peut induire de nombreux biais expérimentaux. À l'inverse, les études très intégratives, allant des mécanismes aux fonctions jusqu'à l'évolution des comportements, sont de moins en moins menées par le même groupe de chercheurs compte tenu de la multiplicité des compétences et techniques à maîtriser, alors que ces études restent fondamentalement complémentaires pour comprendre l'entièreté de la complexité comportementale. De plus, concernant les études causales des comportements, les développements technologiques en neurobiologie ont entraîné un désintérêt pour les études physiologiques et génétiques des comportements. Enfin, un recul clair des études longitudinales est constaté alors qu'elles sont nécessaires pour comprendre l'ontogenèse et la phylogenèse des comportements.

Plusieurs freins à un bon épanouissement de l'éthologie en France sont clairement identifiés. D'une part, la discipline et ses enjeux restent encore mal connus, en dépit des efforts de médiatisation des chercheurs auprès du grand public. De plus, dans un cadre national, les disciplines du vivant sont souvent hyper-spécialisées, alors que l'éthologie englobe un cadre de réflexion très large. En conséquence, l'éthologie est souvent mal représentée dans les instances, et mal identifiée dans les appels d'offre. Par exemple, dans le cadre de l'ANR,

l'éthologie est dispersée dans plusieurs comités (neurosciences cognitives, écologie/biologie des organismes, agronomie/bien-être animal, sciences humaines/langages). De fait, le peu de financements nationaux dédiés à l'éthologie en limitent le dynamisme. Actuellement, le soutien à la recherche axé sur l'analyse du comportement en tant que tel disparaît en faveur d'une recherche axée sur les circuits neuronaux. Tandis que la recherche sur les circuits neuronaux est indéniablement importante, notre capacité à poser des questions significatives sur le fonctionnement de ces circuits est irrémédiablement limitée par notre capacité à identifier et à mesurer les outputs comportementaux de l'activité de ces circuits neuronaux.

II. Psychologie

La recherche en psychologie vise au développement de modèles des processus mentaux sous-jacents aux comportements. Les indicateurs physiologiques et techniques de neuro-imagerie prennent une part grandissante dans les recherches, mais la spécificité de la discipline est d'établir des modèles des mécanismes mentaux, sans nécessairement recourir dans le langage de description au substrat biologique. L'objectif est de réaliser une description fine des différents mécanismes cognitifs, affectifs, émotionnels et sociaux à partir de nombreux indicateurs, comportementaux (temps de réaction, pourcentage de réussite...), verbaux, et physiologiques.

Les spécialités représentées dans les unités CNRS sont celles traditionnellement identifiées dans la discipline, notamment : psychologie cognitive, psychologie du développement, ergonomie, neuropsychologie et psychologie sociale. S'ajoutent la philosophie de la cognition et la psychologie économique.

Sans prétendre à une liste exhaustive, les thématiques/fonctions étudiées dans les recherches conduites au sein des unités CNRS

sont principalement les suivantes : apprentissage, mémoire, perception, action, langage, prise de décision, raisonnement, cognition sociale, comportements collectifs et relations intergroupes, émotions, fonctions exécutives. Ces recherches sont conduites essentiellement chez l'homme, mais aussi chez l'animal, et elles se déclinent en études du fonctionnement normal ou pathologique, à tous les âges de la vie (psychologie du développement, vieillissement cognitif), et dans des perspectives fondamentales aussi bien qu'appliquées.

A. Faits marquants et enjeux sociétaux pour la psychologie

Les recherches en psychologie ont des implications d'intérêt majeur pour la société dans de nombreux domaines. Les travaux sur l'apprentissage et le développement apportent des contributions essentielles concernant les questions relatives aux pratiques éducatives, la pédagogie, le numérique éducatif, l'enseignement adapté, mais aussi les troubles des apprentissages et l'accompagnement des effets délétères du vieillissement. En révélant les déterminants des comportements individuels et collectifs, la recherche en psychologie apporte des connaissances cruciales pour répondre à de nouvelles problématiques liées à l'évolution de la société et aux innovations technologiques. Ainsi au niveau social, ces recherches peuvent éclairer les questions d'intégration, de discrimination, d'égalité homme-femme ou encore de radicalisation. Sur le plan des innovations technologiques et des nouveaux objets culturels, la recherche en psychologie contribue à la fois à leur développement et à répondre aux questions posées par leur utilisation, dans les domaines par exemple des interactions humain-machine, des objets connectés, des réseaux sociaux, ou encore des véhicules autonomes. La compréhension des mécanismes sous-tendant les jugements et décisions humaines ont également une portée vis à vis de problématiques actuelles telles que la transition énergétique, le dévelop-

pement durable, l'éthique, la résistance aux infox... Enfin, la recherche en psychologie, aussi bien fondamentale que translationnelle, répond à des enjeux de santé, en matière de prévention, diagnostic et prise en charge, avec des répercussions directes dans le domaine des pathologies mentales, des addictions, du handicap moteur et sensoriel ou encore la préservation de l'autonomie des séniors.

1. Perception

Les études de la perception contribuent d'une façon majeure à la compréhension du fonctionnement du cerveau et des mécanismes sous-tendant la perception sensorielle. Bien que peu nombreux, les chercheurs étudiant la perception sont très présents au niveau international notamment en ce qui concerne la psychophysique visuelle et auditive. Ils se sont regroupés pour fonder plusieurs GDR : GDR Vision, GRAEC (Audition), GDR O3 (Olfaction), GDR Vertige (vestibulaire), GDR ACT (toucher) ou Neuro-Musique. Un focus sur deux des modalités sensorielles étudiées, la vision et l'audition, permet de dégager plusieurs thèmes actuels majeurs. En audition, notamment en psychophysique, un intérêt particulier est porté sur l'étude de la sensibilité à l'harmonicité, à l'enveloppe temporelle et à la structure temporelle fine des sons chez des auditeurs normaux, atteints de pathologies cochléaires ou porteurs d'implant cochléaire. La modulation de la perception auditive en fonction du contexte est également une thématique porteuse. Il est à noter une augmentation des recherches fondamentales, cliniques et appliquées, abordant le rôle de la musique. Les études psychophysiques sur la perception visuelle se sont dernièrement intéressées à la plasticité du système visuel chez l'homme adulte ou encore à la modélisation de la confiance visuelle. L'étude de la pathologie a conduit à des travaux de recherche translationnelle sur la malvoyance. Les travaux portant sur la perception ont mené au développement de systèmes d'aide visuelle, auditive ou au développement de modèles neuro-computationnels. Plus globalement, l'utilisation de situations

expérimentales plus écologiques (sons ou images naturelles...) autorise une meilleure évaluation et prise en compte de la qualité de vie. L'étude de l'inférence perceptive est rendue possible notamment grâce au développement de modèles bayésiens – codage prédictif, inférence circulaire... –, modèles de diffusion...

2. Mémoire

Concernant la mémoire, l'étude de la mémoire de travail, système cognitif chargé du maintien et du traitement simultané de l'information, a connu un regain d'intérêt ces dernières années, avec notamment l'émergence de nouveaux modèles. La mémoire à long terme fait également l'objet de nombreux travaux, notamment la mémoire épisodique. Les chercheurs français se focalisent sur le fonctionnement mnésique chez des adultes et sur son évolution avec le vieillissement, normal ou pathologique. Dans une part importante de ces travaux, un grand intérêt est porté aux variations inter et intra-individuelles. En parallèle, des travaux utilisant des approches multidisciplinaires et intégratives originales, à l'interface des thématiques portées par l'INSHS et l'INSB, s'orientent vers la compréhension des mécanismes du fonctionnement et des dysfonctionnements de la mémoire individuelle et collective (dans la lignée du projet « 13 novembre » sur la mémoire des attentats). En effet, la mémoire est individuelle et participe à la construction identitaire de l'individu. Mais la mémoire est aussi collective et joue un rôle social. Enfin et surtout, la mémoire est faillible. Comprendre les processus d'oubli ou de distorsion de la mémoire, qu'ils soient normaux ou pathologiques, représente un enjeu sociétal important. Ainsi, le GDR Mémoire affiche une ouverture clairement interdisciplinaire (Philosophie, Neurosciences, Psychologie, Histoire, Sciences Politiques).

3. Langage

Dans le champ de la psycholinguistique, le thème de la lecture et plus précisément de la

reconnaissance de mots reste un thème fortement porté depuis plusieurs années. On note une évolution forte dans ce domaine vers un intérêt de plus en plus marqué pour l'apprentissage de la lecture (vs la lecture experte), avec à la fois l'intégration d'apports issus des neurosciences développementales et de la modélisation, et la conduite d'études « hors laboratoire ». Le thème de la dyslexie du développement reste, depuis une ou deux décennies, fortement porté et très visible internationalement, avec un intérêt croissant chez l'adulte dyslexique. Chez l'expert, la lecture reste un thème très visible internationalement, avec une activité de modélisation, basée aussi bien sur l'identification des niveaux fonctionnels mais aussi leurs substrats fonctionnels. Dans le domaine comportemental, les *mégastudies* se sont développées, permettant l'intégration « naturelle » des très nombreuses variables qui concourent à caractériser le matériel linguistique. Le développement des bases de données, amorcé il y a quelques années, se poursuit permettant aux chercheurs d'avoir accès à des propriétés de plus en plus larges (émotion, imageabilité, etc.).

La question de la production du langage, toujours plus en retrait que la reconnaissance/compréhension, fait cependant l'objet d'intérêts tant au plan du lexique que du texte. Dans le champ du langage oral, la psycholinguistique développementale, c'est-à-dire l'étude du développement du langage, demeure aussi un point fort des recherches en France. Les recherches sont conduites sur l'acquisition du langage parlé afin d'identifier les indices qui sont extraits dans le signal et qui constituent les unités d'élaboration des différents « mots » de la langue. Les travaux, basés initialement sur la sensibilité aux régularités statistiques et aux propriétés rythmiques permettant d'identifier les mots, se sont élargis au développement des mécanismes reliés à la compréhension, notamment syntaxique.

Les questions reliées à la communication, incluant les questions de prédiction et d'activités conjointes et collaboratives, sont émergentes. Dans ce cadre, une évolution importante a trait à l'intégration de dimensions cognitives

non purement linguistiques, telles que les émotions, l'attention, les fonctions exécutives, etc. Les questions liées au bilinguisme et à l'apprentissage des langues secondes, connaissent un certain développement – aussi via les travaux menés par les unités relevant prioritairement de la section 34 et secondairement de la section 26, bien qu'encore fortement en deçà de l'importance de ce thème au plan international.

4. Développement et apprentissage

Les chercheurs des différentes unités de recherche, en combinant des approches comportementales et de neuroimagerie de pointe chez l'enfant et l'adolescent, contribuent à l'élaboration de modèles théoriques du développement neurocognitif, affectif, moteur ou socio-émotionnel de l'enfant, de l'adolescent et du jeune adulte qui sont très largement diffusés à l'international. Les chercheurs des unités CNRS sont également à la pointe des recherches sur les compétences implicites que possède le nourrisson sur le monde et les mécanismes qui lui permettent d'acquérir de nouvelles compétences. En complément de ces recherches sur le développement neurocognitif, affectif, moteur ou socio-émotionnel de l'enfant et de l'adolescent, les chercheurs des unités CNRS ont contribué à l'émergence des travaux sur l'apprentissage implicite et ont proposé des modèles théoriques originaux qui permettent de repenser les rapports entre conscience, mémoire et apprentissage. Ces travaux, qui pour une grande part s'inscrivent dans le cadre général du *statistical learning*, visent à étudier la part des apprentissages qui émerge par détection des régularités statistiques et la part qui nécessite un investissement attentionnel important.

5. Cognition sociale & régulation sociale du comportement

La cognition sociale renvoie aux processus cognitifs impliqués dans les réponses aux comportements de nos congénères, et plus généra-

lement dans le comportement social. Ce courant de recherche, qui trouve son origine dans le champ de la psychologie sociale et l'étude de la perception des objets sociaux, fait partie intégrante aujourd'hui de tous les domaines d'étude de la psychologie et des neurosciences. Dans le champ de la psychologie sociale, la cognition sociale s'est progressivement orientée vers la prise en compte des processus implicites ou automatiques, tendance qui ne cesse de se renforcer. L'étude de la cognition sociale contribue grandement à la compréhension des retombées des évolutions sociétales récentes, comme par exemple de certaines conséquences politiques des mouvements migratoires des populations, de l'adhésion aux théories du complot, ou encore de la nécessité de favoriser des changements attitudeux et comportementaux à grande échelle afin de favoriser la préservation de l'environnement. L'essor de la technologie et de l'intelligence artificielle a par ailleurs impulsé l'étude de la cognition sociale en rapport avec des agents non-humains. On a ainsi pu voir se développer la thématique de la « robotique sociale » dans plusieurs unités.

Depuis plusieurs années, on constate un intérêt croissant pour les déterminants sociaux et psychosociaux de la cognition et du fonctionnement cérébral chez l'homme et l'animal. Dans ce cadre, des efforts particuliers ont été fournis pour aller au-delà de l'étude des situations d'observation de stimuli sociaux et s'orienter vers des situations de véritable interaction. Par ailleurs, plus spécifiquement dans le champ de la psychologie sociale, sont pris en compte des facteurs d'un niveau d'analyse relativement macroscopique, tels que l'appartenance aux différents groupes sociaux (de genre, de statut socio-économique, de groupe ethnique, entre autres), qui sont autant de sources d'influence culturelle. Ces études ont montré entre autres comment ces facteurs pouvaient impacter la façon d'appréhender certaines situations, telles que par exemple des situations d'évaluation, et par là le fonctionnement et la performance cognitive. Des recherches se sont aussi saisies des évolutions ou problématiques sociétales récentes, comme par exemple le processus de radicalisation ou

encore l'objectification sexuelle (et plus largement la déshumanisation). À l'heure du numérique, des chercheurs examinent les antécédents et conséquences de l'utilisation intensive des nouvelles technologies et des réseaux sociaux (par exemple, le cyber-harcèlement, la construction des identités numériques), qui sont eux-mêmes en constante évolution. En parallèle s'élaborent des modélisations des dynamiques sociales collectives au sein de ces nouveaux espaces, qui produisent par ailleurs quotidiennement une masse de données comportementales jusqu'alors inégalée. Enfin, on a vu également se développer une psychologie sociale du vieillissement cognitif et de la santé.

6. Éducation

L'ensemble des travaux menés dans les différentes UMR a aujourd'hui un impact important pour la compréhension des mécanismes cognitifs, sociaux, émotionnels et affectifs qui sont engagés dans les apprentissages scolaires en primaire, au collège, au lycée et à l'université. Les chercheurs de ces UMRs en interaction directe et forte avec la communauté éducative mènent des recherches de pointe et d'avant-garde en psychologie des apprentissages et de l'éducation qui ont pour objectif de contribuer à l'amélioration du système éducatif en France et à l'étranger. Les travaux des chercheurs des unités ont par exemple contribué à mieux comprendre les processus neurocognitifs impliqués dans les apprentissages scolaires fondamentaux (lecture, écriture, mathématiques, raisonnement, argumentation) mais aussi dans l'acquisition de capacités exécutives, métacognitives, attentionnelles ou socio-émotionnelles (coopération, collaboration, empathie, théorie de l'esprit), mécanismes plus généraux impliqués dans tous les apprentissages scolaires. Ces recherches sont menées sur des populations d'enfants et d'adolescents neurotypiques ou présentant des troubles des apprentissages (dyslexie, dyspraxie, dyscalculie), du comportement (TDAH) ou neuro-développementaux (autisme). Ce champ de recherche contribue également *via* des essais contrôlés randomisés, menés dans les écoles, à très large échelle (plu-

sieurs milliers d'enfants ou d'adolescents) à évaluer finement, comme en médecine, les effets d'interventions ciblées, sur les apprentissages d'enfants et d'adolescents avec ou sans troubles du développement et des apprentissages. Ces travaux permettent pour la première fois d'apporter des réponses concrètes à la réduction des inégalités éducatives. L'ensemble de ces travaux combinant des méthodes comportementales, de modélisation et de neuroimagerie contribuent à faire émerger au CNRS les nouvelles sciences de l'éducation ou neuroéducation à l'interface des sciences humaines et sociales (INSHS), de la biologie (INSB), et de la modélisation (INS2I).

7. Psychologie économique

Des unités et des chercheurs relevant de la section 26 sont engagés dans des recherches frontalières avec la section 37 « économie et gestion ». Ces recherches empruntent les protocoles de l'économie expérimentale (e.g. jeux économiques, marchés expérimentaux, décisions financières), tout en y associant des traitements ou des mesures issues de la psychologie expérimentale, ou en les conjuguant avec des méthodes d'imagerie cérébrale. L'objectif de ces travaux de psychologie économique ou de neuro-économie est souvent d'élucider les mécanismes cognitifs ou les substrats cérébraux qui sont postulés mais non explorés par les modèles d'économie comportementale. Il est ainsi possible, par exemple, d'évaluer la spécificité avec laquelle le cerveau évalue les récompenses financières, ou bien d'identifier les mécanismes cognitifs qui permettent l'établissement de la coopération économique entre agents humains ou non-humains. Ces recherches bénéficient souvent de la proximité spatiale avec des unités de recherche en économie déjà largement engagées dans les pratiques expérimentales.

8. Évolutions méthodologiques

À travers ces exemples d'avancées dans différentes thématiques, se dégagent des évolu-

tions transversales importantes au niveau des outils et des méthodes. On note en premier lieu l'intensification du couplage des mesures comportementales ou psychophysiques avec des indicateurs physiologiques. Cette évolution va de pair avec l'accroissement d'approches pluridisciplinaires et le développement de plateformes d'étude du comportement. L'utilisation des technologies du numérique a amené de nouvelles approches méthodologiques et expérimentales, aussi bien dans les investigations comportementales que neurophysiologiques. Ainsi, la modélisation informatique peut se faire à très grande échelle, autorisant le recueil de gros volumes de données, dont l'enregistrement et l'analyse n'étaient pas envisageables auparavant. C'est le cas par exemple avec le recours de plus en plus fréquent à des techniques sophistiquées d'enregistrement de variables comportementales et physiologiques, telles l'oculométrie et la neuroimagerie, qui génèrent d'importantes masses de données.

En parallèle, de nouvelles approches comportementales émergent *via* des procédures de collecte permises par les outils numériques ou les plateformes web (ex. *Mechanical Turk*), pouvant être associées aussi au recueil de données massives. Des travaux en modélisation computationnelle ou intelligence artificielle se sont développés par ailleurs aujourd'hui dans plusieurs unités de recherche. On note ainsi un essor important du *machine learning*, qui répond notamment aux besoins de traitement des données massives. Des nouvelles approches statistiques et un raffinement des analyses tendent également à se systématiser (inférences bayésiennes, puissance statistique *a priori*, analyses multiniveaux...). Ces approches statistiques font écho à une sensibilisation croissante à la question de la réplication et aux « bonnes pratiques ».

L'augmentation des études longitudinales ainsi que la mise en œuvre de recherches translationnelles (autour de la pathologie ou vers l'éducation) constituent également des évolutions marquantes des dernières années. Se multiplient aussi des travaux qui visent à la conduite d'une recherche dans un cadre plus « écologique ». Ce souci d'une approche plus

proche des conditions naturelles, tout en maintenant un contrôle fin des conditions expérimentales, conduit par ailleurs à un développement des recherches s'appuyant sur les dispositifs d'environnement virtuel, dont plusieurs laboratoires sont maintenant équipés.

La discipline conduit depuis quelques années un auto-examen approfondi, qui ne cesse de la faire évoluer, notamment au niveau des pratiques méthodologiques. Ces efforts ont été impulsés principalement par les chercheurs dans le champ de la psychologie sociale, qui continuent à tracer la voie dans le développement de ces pratiques qui tendent aujourd'hui à se généraliser. Une tendance forte vers davantage de transparence et des pratiques plus fiables s'affirme. Ainsi, les bonnes pratiques méthodologiques sont de plus en plus appliquées : le pré-enregistrement des protocoles d'étude et des analyses statistiques planifiées avant la récolte des données, la prise en compte de la puissance statistique et de l'importance de la réplication, le partage ouvert avec la communauté scientifique du matériel utilisé et des données récoltées, pour n'en citer que quelques-unes. Si ces nouvelles contraintes nécessitent davantage d'anticipation et de temps investi que ce qui était le cas il y a quelques années, elles garantissent en contrepartie une plus grande fiabilité des résultats observés et une plus grande transparence de la démarche scientifique.

B. Domaines en régression et contraintes

Le développement important de recherches combinant mesures comportementales et physiologiques, se traduit par un recul relatif des approches strictement psychophysiques qui demeurent cependant essentielles à une compréhension complète des processus mentaux. Par ailleurs, l'accroissement des approches transdisciplinaires conduit à une diminution des études mono-disciplinaires. Dans le même temps, on constate un recul de certaines

interactions entre la psychologie et d'autres disciplines des SHS comme la sociologie et l'histoire.

On notera enfin aujourd'hui, au sein des unités relevant de la section 26, une moindre représentation de la spécialité ergonomie. Cette moindre visibilité s'explique en partie par un fractionnement sur plusieurs sections et instituts (INS2I) ainsi qu'une dilution de la psychologie ergonomique dans les recherches partenariales ou portant sur l'utilisation des nouvelles technologies, qui sont menées dans les autres spécialités.

Les évolutions thématiques et méthodologiques s'accompagnent de nouvelles contraintes. Principalement, l'utilisation d'outils de plus en plus sophistiqués et le développement de plateaux techniques conjuguant des techniques variées posent le problème de leur maîtrise et de la gestion de leur fonctionnement. Dans ce cadre, les limites en potentiel humain qualifié, techniciens ou ingénieurs, constituent un frein important à la recherche. Ceci soulève aussi la question de la formation des étudiants qui intègre encore insuffisamment l'enseignement des nouvelles techniques. L'évolution des pratiques méthodologiques et statistiques impose également aujourd'hui le recueil de données sur des échantillons de participants beaucoup plus grands. Cette évolution, bien que positive et nécessaire, vient considérablement impacter la conduite des recherches (temps d'expérimentation, occupation des espaces, recrutement, coût financier...).

III. Neurosciences

Les neurosciences sont un ensemble de disciplines de la biologie qui ont pour objet commun l'étude du système nerveux et pour objectif de comprendre les bases neuronales du comportement et de la cognition. Les recherches menées par les chercheurs de la section 26 portent traditionnellement sur les grandes fonctions cérébrales comme la

mémoire et l'apprentissage, le développement, la motricité ou encore la perception sensorielle. Cette recherche est renforcée par des évolutions méthodologiques avec un raffinement des approches multi-échelles ainsi que des approches d'enregistrements multimodaux en situation naturelle ou proche des conditions de vie réelle et le renforcement des études sur la cognition sociale, la prise de décision, les émotions et leur impact sur la cognition.

A. Faits marquants et enjeux sociétaux des neurosciences

1. Apprentissage et mémoire

L'étude de la mémoire et de l'apprentissage reste un des thèmes de prédilection de la recherche en France dans le domaine des neurosciences. Elle s'est enrichie d'approches translationnelles en imagerie et neuromodulation transcrânienne (e.g. IRMf, EEGhd, rTMS, tDCS) et de manipulations génétiques de plus en plus sophistiquées. Parmi les concepts émergents, « l'embodied cognition » a fortement élargi le champ d'investigation du neurone vers ses interactions avec la glie, le système vasculaire et le microbiote. Il y a aussi un véritable engouement pour étudier l'influence de l'environnement notamment en ce qui concerne l'impact des expériences ou modes de vie, de la nutrition ou des relations sociales. On constate une ré-émergence importante de l'épigénétique du comportement dans des conditions physiologiques ou pathologiques (stress post-traumatique ou prénatal, maltraitance...). L'attente sociétale et la pression de valorisation de la recherche fondamentale stimulent fortement les travaux sur les déficits cognitifs les plus précoces, les processus de compensation et leurs origines physiopathologiques dans les maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson...). De façon générale, le développement de nouveaux concepts de neuropathologie et l'identification de biomarqueurs précoces au stade prodromal constituent désormais les fondements d'une

démarche résolument tournée vers l'innovation et la découverte de nouvelles cibles thérapeutiques pour les affections neurologiques en mal de thérapies curatives. La recherche chez l'animal bénéficie des progrès du génie génétique pour le marquage, la modulation et le suivi de l'activité d'assemblées neuronales spécifiques, voire de neurones individuellement identifiés (manipulation génétique, optogénétique, imagerie calcique) qui permettent notamment de passer du concept d'engramme à la trace physiologique *in vivo* laissée par le traitement d'une information mnésique, ou de progresser enfin dans la compréhension du rôle de la neurogenèse développementale et adulte dans les processus d'apprentissage et de mémoire au cours de la vie.

2. Le développement

L'étude du développement se retrouve à la fois dans le domaine des neurosciences et de la psychologie, chez l'homme et l'animal. Les travaux chez le bébé couvrent de nombreux champs des neurosciences intégratives et cognitives depuis les couplages précoces perception-action, fondamentaux pour la construction des modèles internes et des apprentissages jusqu'à la cognition sociale avec la perception des visages, le langage et la conscience. L'attention et les fonctions exécutives restent des incontournables du développement cognitif, en lien avec l'étude des apprentissages des règles de grammaire et de calcul. Il est à noter un regain d'intérêt pour l'exploration des liens qui unissent langage et sensorimotricité, qui s'inscrit dans la progression du courant de la cognition incarnée. Les sciences développementales ont développé des paradigmes comportementaux adaptés à l'exploration cérébrale (EEG et fNIRS) pour tester les enfants tout au long de l'ontogénèse, y compris les plus jeunes, grâce à la mise en place de protocoles préverbaux au sein de *babylabs* implantés dans les laboratoires ou directement en maternités.

Aux études qui explorent les périodes de transition au cours de la petite enfance et de

l'enfance, se sont légitimement imposées les études sur la période critique de l'adolescence. L'adolescence est caractérisée par un bouleversement hormonal à la puberté, et la maturation tardive des régions corticales impliquées dans le contrôle exécutif et la cognition sociale. Le déficit de contrôle et de rationalité, l'importante impulsivité et la sensibilité excessive aux récompenses et addictions, pourraient s'expliquer par le déséquilibre entre un système sous-cortical mature et un système cortical dont la maturation cérébrale tardive se poursuit encore après 20 ans. Les données chez le rongeur ont permis de poser ou renforcer de nombreuses hypothèses neurobiologiques de l'adolescence humaine sur les plans comportemental, hormonal et neuronal.

La recherche développementale typique en neurosciences est très étroitement associée aux modèles neuro-développementaux issus des données cliniques, épidémiologiques, génétiques et des modèles animaux. Le recours à la modélisation en intelligence artificielle et réseaux profonds pour explorer au mieux les données développementales typiques et atypiques, constitue une nouvelle avancée méthodologique. Enfin, les nouvelles tendances préconisent l'intégration épigénétique et systémique des interactions entre phases de développement et contexte environnemental. Ceci nécessite une approche multidisciplinaire à la croisée de l'INSB et de l'INSHS, et la constitution de cohortes à grande échelle, avec suivi à long terme, qui permettent à la fois les études transversales, et longitudinales, pour déterminer l'impact des anomalies développementales tout au long de l'ontogénèse, y compris à l'âge adulte et au cours du vieillissement.

3. Motricité

Comportements essentiels à l'exploration de l'environnement physique et social, dès le plus jeune âge, les comportements moteurs jouent un rôle essentiel de dialogue entre l'individu et son milieu. Directement observables et quantifiables dès la naissance, les comportements sensorimoteurs sont les résultats de

nombreux processus complexes d'intégration, de représentation, de planification et d'exécution, aussi bien au niveau cérébral que spinal. L'étude des comportements moteurs inclut une diversité de modèles (oculomotricité, posture et locomotion, coordination bimanuelle, saisie) étudiés autant chez l'homme (biomécanique, bases neurales, approche naturalistique, modélisation et robotique), que chez l'animal (préparations réduites de moelle épinière, réseaux locomoteurs, approche cellulaire, modèles génétiques).

La compréhension des représentations du corps en action, autrement dit le schéma corporel, s'appuie sur des modèles variés tels que l'ontogénèse, les pathologies proprioceptives et vestibulaires et la microgravité. Une approche en milieu écologique ou « naturalistique » s'attache à démontrer l'influence du contexte social, motivationnel, émotionnel et des environnements extrêmes, sur les performances motrices humaines, les expertises et les adaptations au cours des différentes périodes de la vie ou encore lors de diverses pathologies traumatiques ou neurodégénératives. Des *living lab* ou *street lab* ont été mis en place afin de reproduire des environnements réels (petit appartement) ou virtuels pour évaluer, en conditions écologiques, les difficultés induites par une pathologie, un handicap ou le vieillissement. De façon complémentaire, des systèmes embarqués sur le sujet lui-même ou dans son environnement et des études en « Ecological Momentary Assessment » (EMA) permettent de recueillir le comportement locomoteur dans lequel l'individu évolue naturellement au quotidien et de monitorer l'état du sujet à l'aide d'outils connectés du quotidien.

La compréhension des bases neurales du contrôle moteur s'appuie également sur l'utilisation de modèles animaux plus simples (drosophile, aplysie, écrevisse, lamproie, amphibiens, rongeurs...). Ces études dissèquent l'intimité du circuit, en caractérisant la neuro-modulation, la plasticité synaptique consécutive aux apprentissages et aux processus post-lésionnels. Ces modèles permettent de comprendre les mécanismes de dynamiques des réseaux, notamment locomoteurs, qui s'ap-

pliquent à une approche comportementale de la motricité chez l'homme. Ils permettent aussi d'appréhender le rôle spécifique de chacun des éléments du réseau, ouvrant ainsi de nouvelles voies thérapeutiques pour les pathologies neurodégénératives ou post-traumatiques.

Enfin, l'étude des comportements moteurs, inspirée des approches cellulaires ou biomécaniques trouvent naturellement des applications en modélisation et en robotique, telles que l'implémentation sur des robots volants de stratégies de navigation spatiale issues de la recherche chez l'insecte ou encore le développement d'exosquelettes et d'interfaces cerveau-machine pour suppléer aux carences fonctionnelles engendrées par le handicap moteur.

4. Fonctions sensorielles

La plupart des modalités sensorielles (vision, audition, olfaction, gustation, toucher, perception vestibulaire) font l'objet d'études visant à comprendre comment le système nerveux détecte les stimuli physiques ou chimiques, les transforme en activité neuronale (transduction) et traite ces informations de bas niveau pour en extraire des informations de niveau supérieur (par exemple, reconnaissance d'objets) mais aussi combine les informations provenant de modalités sensorielles différentes pour créer des représentations multimodales.

L'étude des fonctions sensorielles met en jeu une approche multidisciplinaire alliant des mesures comportementales en réponse à des stimulations sensorielles contrôlées, des enregistrements électro- ou optophysiques périphériques ou centraux chez l'animal, des interventions électriques, pharmacologiques ou optogénétiques, des approches d'imagerie cérébrale chez l'homme et des approches computationnelles ou psychophysiques. L'extraordinaire développement des techniques d'enregistrement permet maintenant de mesurer simultanément, pendant de longues périodes de temps, l'activité de très nombreuses unités neuronales en électrophysiologie (mul-

tiélectrodes) ou de volumes entiers de cerveau en imagerie. Ces enregistrements massifs de l'activité neuronale rendent les approches computationnelles et la modélisation indispensables pour comprendre le fonctionnement des réseaux neuronaux impliqués dans les processus perceptifs.

La recherche sur les fonctions sensorielles implique différents niveaux d'étude : (i) la compréhension des phénomènes moléculaires de transduction, de la structure et du fonctionnement des protéines impliquées, des phénomènes de modulation périphérique ; (ii) la compréhension des règles de codage neuronal, incluant les traitements neuronaux de bas niveau par le biais des circuits récurrents locaux ; (iii) le traitement parallèle et l'intégration d'informations sensorielles acquises simultanément (différents éléments d'une scène visuelle et/ou au cours du temps perception du mouvement) à différentes échelles le long de la hiérarchie des systèmes sensoriels ; (iv) les multiples interactions entre structures cérébrales ; (v) l'intégration multisensorielle. Actuellement, la question de l'intégration multi-sensorielle est en forte expansion, que ce soit au niveau cortical ou sous cortical chez les mammifères, ou au sein des centres supérieurs du cerveau des insectes.

Les recherches sur les systèmes perceptifs s'inscrivent souvent dans une perspective comparative, du fait des importantes similitudes d'architecture neuronale des systèmes sensoriels et de leurs principes de fonctionnement observés tout au long de l'évolution. Cette approche comparative joue un rôle fondamental dans le développement des stratégies biomimétiques accompagnant le développement des robots autonomes.

Les études expérimentales du fonctionnement des systèmes perceptifs jouent un rôle majeur dans le développement des travaux visant à compenser, chez l'Homme, les déficiences sensorielles liées au handicap et au vieillissement normal ou pathologique. L'objectif est de développer des méthodes pour tenter d'activer artificiellement les circuits neuronaux sensoriels, en court-circuitant les zones pathologiques et en se rapprochant le plus de

l'activation naturelle. Il s'agit aussi d'estimer les conséquences en termes de réorganisation des circuits cérébraux de la mise en place de prothèses (implants cochléaires pour l'audition, rétines artificielles pour la vision) ou de l'utilisation de dispositifs de suppléance sensorielle (visuo-tactile, visuo-auditif, etc.). Ces travaux interrogent alors les capacités de plasticité structurelle et fonctionnelle de nos systèmes perceptifs en réponse à une activation non naturelle mais également dans les interactions perception-action par le biais de systèmes de réalité virtuelle ou de réalité augmentée.

5. Prise de décision et cognition sociale

Les comportements de choix nécessitent la prise en compte de plusieurs variables décisionnelles telles que l'utilité, l'incertitude, le temps ou l'effort. Ces variables se combinent pour définir la valeur subjective de chaque option ou action considérée. Ce processus est basé sur l'apprentissage préalable d'actions antérieures, apprentissage qui permet d'estimer les récompenses (et punitions) attendues. Lorsqu'elles sont prises dans un contexte social, ces décisions peuvent impliquer une réflexion stratégique sur les intentions d'autrui et sur l'impact des comportements effectivement engagés sur la base de ces intentions. Le choix est également influencé par différentes émotions qui servent à réguler nos décisions de manière adaptative afin, par exemple, de nous protéger des prises de risque excessives, de nous tenir à l'abri du regret ou d'éviter le rejet social et les conflits interpersonnels. Un grand nombre d'observations comportementales réalisées chez l'homme ont été confirmées chez l'animal (e.g. distorsions de probabilité, maximisation des taux de récompense à long terme ou aversion à l'inégalité). En accord avec la théorie économique plusieurs travaux récents réalisés tant chez le primate non humain (PNH) que chez les patients humains ont pu disséquer les mécanismes neuronaux impliqués dans la prise de décision ainsi que ses altérations. Les études de neuroimagerie chez l'homme et les données électrophysiologiques chez l'animal, ont contribué à l'identi-

cation des réseaux cérébraux activés lors de tâches d'évaluation de récompenses escomptées et de processus de choix. Dans leur ensemble, les résultats récents indiquent que les informations de récompense servant à sélectionner les stimuli pertinents et à orienter les comportements d'approche et d'évitement sont observées au sein d'un réseau cérébral largement distribué. Ces structures corticales (cortex préfrontal, cingulaire, pariétal, inférotemporal) et sous-corticales (striatum, amygdale, colliculus supérieur) sont impliquées dans l'intégration sensorielle ou motrice de haut niveau mais reçoivent également ces signaux de récompense.

Actuellement, on assiste à un intérêt pour les mécanismes de prise de décision mis en jeu par les situations sociales. L'accès aux ressources vitales nécessite l'instauration d'un climat de confiance et de coopération entre les partenaires. L'une des fonctions de l'information sociale réside dans sa nature intrinsèquement gratifiante. Le succès retentissant des applications d'échange de photos sur smartphone et des réseaux sociaux en ligne témoigne de la grande valeur que nous accordons à l'observation et à l'apprentissage de nos congénères. Ces approches se sont développées sur des modèles primates. Lorsqu'ils ont la possibilité de fournir de la nourriture ou d'éviter des stimuli déplaisants à leurs congénères, les singes expriment des tendances sociales variables, dépendantes du partenaire, mais prennent principalement des décisions pro sociales. Ainsi les animaux réticents à l'équité montrent une activité neuronale réduite aux récompenses « partagées » tandis que les animaux à la recherche d'équité montrent une activité neuronale accrue. Parmi les structures cérébrales étudiées, l'orbitofrontal semble apte à effectuer certaines de ces opérations neuronales impliquées dans les comparaisons sociales. Bien que l'échange de produits alimentaires puisse sembler assez rudimentaire par rapport à la complexité des échanges sociaux humains, les résultats obtenus chez le primate soulignent le rôle clé joué par certaines zones corticales préfrontales dans la régulation des mécanismes de base de la coopération et de la compétition.

6. Les émotions et leur impact sur la cognition

Les études centrées sur les réponses émotionnelles ont permis de délimiter les mécanismes et substrats cérébraux des émotions en tant que réactions ou réponses à des stimuli de l'environnement ou des événements internes. Un tournant a été franchi, lorsque les régions connues pour être impliquées dans les réponses émotionnelles se sont révélées être également impliquées lors de la perception des émotions exprimées par autrui. Cette découverte s'inscrit dans la continuité des systèmes miroirs moteurs impliqués dans l'exécution comme dans l'observation de l'action. Dès lors l'étude des émotions en neurosciences a été étendue à l'étude de la perception émotionnelle et a été étroitement liée à la perception sociale. Ceci a conduit à un développement important des travaux dans le domaine des neurosciences affectives et sociales et un recouvrement important entre cerveau émotionnel (perception et réponses émotionnelles, mémorisation d'associations entre stimulus et événement positif/négatif ou récompensant/aversif) et cerveau social (perception et représentation des personnes, cognition sociale) mettant alors les émotions au centre d'une perspective incarnée de la cognition.

L'étude des émotions est centrale en psychiatrie, où de nombreuses pathologies incluent des troubles émotionnels ou de la régulation des émotions, telles que la dépression, les troubles obsessionnels compulsif, la schizophrénie. Les dysfonctionnements émotionnels impliqués dans de nombreuses neuro-pathologies sont souvent présents aux stades les plus précoces des maladies, pouvant précéder les signes cliniques cardinaux. C'est le cas par exemple de la Chorée de Huntington ou de la maladie de Parkinson, où les difficultés socio-émotionnelles pourraient constituer des marqueurs précoces, permettant ainsi de raffiner les outils diagnostiques pour une meilleure prise en charge des patients.

Aujourd'hui l'étude des processus émotionnels se poursuit en interface étroite avec l'étude des processus de motivation et englobe des

modèles animaux invertébrés. Chez l'humain, elle s'étend jusqu'aux étapes cognitives d'élaboration du ressenti et de régulation émotionnelle. Elle est en outre en lien avec l'étude des processus liés au soi : représentation de soi, régulation émotionnelle du soi, et conscience de soi. Les émotions sont des processus fondamentalement dynamiques et les études s'appuient sur les techniques classiques d'imagerie (IRMf et EEG-MEG) et le développement de méthodes d'intégration multimodales combinant activités centrales (cérébrales) et périphériques (conductance électrodermale, dilatation pupillaire, activités électromyographiques, activité cardiaque, etc.) et des approches en réalité virtuelle. Ainsi, l'étude des émotions et de leur influence sur la cognition, qui relevait principalement du champ de la psychologie – cognitive, sociale et clinique – est désormais centrale des neurosciences et devient un élément essentiel dans le champ de la robotique et des interfaces homme-machine.

7. Neurosciences computationnelles et IA

Les neurosciences computationnelles constituent un champ interdisciplinaire en forte expansion qui vise à comprendre ce que fait le système nerveux (modèles descriptifs), comment il le fait (modèles mécanistiques) et pourquoi (modèles interprétatifs). Par le biais de simulations, de modélisations ou d'approches plus théoriques, les neurosciences computationnelles opèrent à travers toutes les échelles, depuis la molécule, neurones et réseaux, jusqu'au comportement et la cognition, et elles permettent de lier ces différentes échelles, de comprendre comment elles interagissent et avec quelle dynamique. Ceci s'opère par un rapprochement de plus en plus important entre les neurosciences computationnelles et expérimentales, avec une réelle intégration des approches interdisciplinaires. Les données sont directement utilisées pour raffiner les modèles, et en retour les modèles permettent d'élaborer des prédictions testables expérimentalement débouchant également dans des approches où la boucle computationnelle

experimental-computationnel est fermée en temps réel.

Un premier cadre paradigmatique permet de quantifier et de comprendre le flux d'information dans le cerveau par le biais de modèles inférentiels de type bayésien par exemple. Des approches plus phénoménologiques, cherchent aussi à modéliser les transformations opérées par les réseaux de neurones en utilisant les progrès de la théorie de l'information. Un second cadre plus mécanistique, cherche à simuler le fonctionnement neuronal avec des modèles de réseaux de neurones réalistes prenant en compte les propriétés neuronales fines (dynamique des conductances synaptiques et extra-synaptiques) dans l'intégration de l'entrée synaptique au niveau neuronal ou du réseau. Les approches computationnelles se sont étendues à la modélisation de comportements ou de pathologies, faisant émerger de nouveaux domaines tels que par exemple, la psychiatrie computationnelle.

Des méthodes récentes d'apprentissage automatique, particulièrement performantes, rassemblées sous les termes « *machine learning* » ou « *deep learning* » jouent un rôle déterminant pour le développement de modèles du fonctionnement cérébral, le diagnostic des pathologies cérébrales ou le traitement de données massives. La capacité de l'intelligence artificielle de trouver des motifs dans des données complexes, multivariées et multi-échelles en fait un outil essentiel pour extraire une information pertinente des données en neurosciences et sciences cognitives. Ces outils permettent de comprendre comment des réseaux de neurones peuvent fonctionner, par exemple en démontrant à des tailles de simulation réaliste des fonctions sensorielles ou motrices. Cependant, face à la massification grandissante des données de neurosciences, l'optimisation de ces outils repose néanmoins sur la création de bases de données correctement indexées et des infrastructures logicielles adéquates qu'il reste à développer à l'échelle nationale. Ainsi neurosciences et intelligence artificielle sont intrinsèquement liées et se doivent de renforcer leurs échanges, les neurosciences pour interroger sur le fonctionnement

cérébral et l'intelligence artificielle pour développer des approches plus efficaces.

8. Neurosciences naturalistiques

Les études en neurosciences, ont longtemps privilégié des contextes expérimentaux utilisant des animaux à faible niveau de variabilité génétique, des paradigmes comportementaux, chez l'Homme et chez l'animal, simplifiant le contexte de la vie réelle en termes de richesse sensorielle, d'interactions sociales, d'espace, d'activité physique, etc. Or, l'influence de l'environnement sur les expressions comportementales et l'ancrage des capacités cognitives au corps (*embodied cognition*) sont tels qu'une prise de conscience s'opère en faveur de la mise en place de contextes expérimentaux, sinon naturels, du moins naturalistiques reproduisant les conditions naturelles grâce à la réalité virtuelle et aux nouvelles technologies connectées. L'approche naturalistique permet l'étude de la variabilité interindividuelle qui peut se révéler être un outil puissant pour éclairer les liens entre comportement et représentation cognitive ou neuronale là où les neurosciences ont surtout cherché jusqu'à présent à extraire les principes communs de traitement de l'information. Similairement, les études interculturelles chez l'Homme participent à cet objectif de dégager les différences de représentations perceptives, cognitives et neuronales entre différentes populations. Autre limitation souvent appliquée en neurosciences, les stimuli sensoriels utilisés pour évoquer des réponses comportementales et cérébrales sont généralement beaucoup plus élémentaires et simples que les stimuli naturels. En olfaction par exemple, on connaît mal la réponse du cerveau olfactif à des odeurs naturelles, les stimuli mono moléculaires et plus rarement des mélanges très simples ayant été généralement utilisés. En vision, un nombre croissant d'études montrent que le système visuel opère dans un régime intrinsèquement différent avec un stimulus naturel (activation éparse et précise) par rapport aux stimuli élémentaires couramment utilisés (activation massive et peu précise). De plus, la plupart des sens sont dits actifs et impliquent un

mouvement des récepteurs (en vision, olfaction, toucher, goût) qui changent drastiquement l'intégration et la représentation de l'information sensorielle. L'utilisation de stimuli écologiques pourrait démasquer des éléments cruciaux du code neuronal du stimulus et des comportements associés à sa perception.

B. Modèles animaux et domaines en régression

1. Quels modèles pour quelles questions ?

Avec l'essor des outils génétiques pour le contrôle et la mesure de l'activité neuronale ciblée, le modèle souris devient le modèle principal en neurosciences. Cependant ce modèle n'est pas systématiquement le modèle adéquat pour répondre à toutes les questions, en raison de ses caractéristiques éthologiques et de son éloignement phylogénétique avec l'homme. D'une manière générale, il est important d'utiliser le modèle animal adapté éthologiquement à la fonction étudiée. Par exemple, le chat et le primate non-humain ont longtemps été les deux modèles phares pour l'étude de la vision, car ces animaux ont la vision comme sens principal mais aussi, pour le PNH, en raison de sa proximité avec l'homme. Depuis 10 ans le modèle souris dépasse tous les autres modèles alors que la souris utilise très peu sa vision (préférant l'olfaction et le sens somato-sensoriel, notamment vibrissal) et que l'organisation de son système visuel est rudimentaire et intrinsèquement différente de celui des primates en termes de connectivité, de représentation corticale et de résolution. Le modèle rongeur sera donc un bon modèle en vision pour l'étude des petits réseaux de neurones pour l'intégration de l'information visuelle vu de manière générique, mais un mauvais modèle pour comprendre l'émergence de la fonction visuelle en tant que telle.

Des enregistrements multi unitaires de l'activité neuronale chez l'animal en comportement peuvent être désormais couplés à des modulations par opto- ou chémo-génétique

de l'activité neuronales ciblées par génie génétique et/ou le traçage fin des projections de ces neurones. Ces approches, par la collecte simultanée d'informations sur l'activité et la connectivité neuronales ouvrent de nouvelles perspectives d'accès au code neuronal et renouvellent l'intérêt de l'utilisation des modèles rongeurs sur lesquels elles ont été mises au point et ont donné des résultats importants. Les méthodes d'opto/chémo-génétiques sont maintenant développées chez le primate qui reste un modèle de choix pour la recherche en neurosciences cognitives.

2. Le primate non-humain

Par leur proximité génétique, physiologique et comportementale avec l'homme, les primates non-humains constituent un modèle animal essentiel aux recherches fondamentales et translationnelles en Neurosciences. Les modèles PNH, macaque et marmouset, sont particulièrement déterminants pour la compréhension de processus complexes mettant en jeu des systèmes fonctionnels organisés de manière spécifique chez les primates tels que le contrôle moteur, les processus motivationnels, les processus sensoriels, multi-sensoriels et attentionnels, les fonctions mnésiques et exécutives, la cognition sociale et le développement cérébral. En complément direct avec l'étude du cerveau chez l'Homme par des méthodes non-invasives les modèles PNH permettent l'utilisation de techniques d'explorations fonctionnelles présentant de biens meilleurs niveaux de résolution spatiale et temporelle. En France, malgré une longue tradition de recherche, notamment en Neurosciences, la structuration de la recherche sur le modèle PNH reste récente et portée par le GDR BIOSIMA nouvellement créé qui augure d'une prise de conscience de la nécessité de développer une stratégie nationale sur la recherche PNH.

3. Domaines en régression et craintes

Il est clair que nous avons assisté à une évolution technologique massive durant ces

dernières décades que ce soit dans le domaine de l'imagerie, de la neuro-ingénierie, des méthodologies de neuro-génétique ou d'analyses de données de masse qui ouvrent des perspectives d'investigation immenses. Cependant, cette évolution technologique nécessite de plus en plus de moyens financiers notamment au travers d'un coût grandissant des plateformes en termes d'équipement et de moyens humains qui se doivent d'être assurés de façon pérenne.

Parmi les secteurs qui semblent marquer le pas, certaines craintes apparaissent en ce qui concerne l'anatomie fonctionnelle et les expertises en histologie mais également l'électrophysiologie sur l'animal éveillé. Ce point apparaît paradoxal dans un contexte où l'électrophysiologie unitaire chez l'homme au travers des enregistrements intra-craniens devient une approche qui se généralise dans l'étude des fonctions sensorielles et cognitives chez l'homme en situation contextualisée.

Conclusion

Tout d'abord, nous souhaitons préciser que ce rapport ne se veut en aucun cas comme exhaustif de l'ensemble des recherches menées dans les laboratoires de la section. Nous avons voulu principalement insister sur les approches en émergence et les interactions entre les trois disciplines phares qui font de la section une véritable section interdisciplinaire.

En effet, de par son caractère résolument multidisciplinaire, la section 26 se retrouve au centre de plusieurs enjeux sociétaux. Ainsi, l'étude des dysfonctionnements des grandes fonctions cérébrales constitue actuellement un enjeu sociétal et économique majeur dans un contexte d'allongement de l'espérance de vie, mais également dans une optique de réduction de la prévalence des pathologies mentales (neurologiques et psychiatriques), y compris au cours du développement. Il s'agit là d'un défi particulièrement important à relever

sachant que le coût en France des pathologies du cerveau s'élève annuellement à plus de 100 Md€. Ainsi, pour répondre à ce défi, à l'interface entre la recherche fondamentale et clinique, le développement de modèles animaux adaptés reste central aux approches développées. La section 26 est attachée à une approche non anthropocentrée de la recherche en science cognitive et du comportement. Par ailleurs, au-delà des questions de santé, les travaux conduits au sein de la section répondent à de multiples enjeux sociétaux, avec des implications dans divers domaines, tels que l'éducation, l'économie, ou encore des problématiques liées à l'évolution de la société les nouvelles technologies ou le bien-être animal. Enfin, la complexité du système nerveux central impose de nouveaux cadres conceptuels issus de synergies entre chercheurs en neurosciences intégratives, mathématiques et physique et s'appuyant sur la modélisation des processus. Les neurosciences computationnelles, combinant données expérimentales et théoriques, ouvrent de larges perspectives dans le développement de l'intelligence artificielle et des interactions homme-système centrées sur les sciences cognitives.

Pour alimenter ce rapport de conjoncture, nous avons interrogé directement les directeurs d'unités et responsables d'équipes des laboratoires de la section, sur l'état des lieux de la discipline, leur vision des évolutions à venir et leurs craintes quant à leur domaine et leur pratique de recherche. Dans les réponses obtenues, il est reconnu de façon quasiment unanime que la recherche développée en France porte en elle une spécificité et une reconnaissance internationale avérées. Cependant, outre les freins notoires liés au manque de moyens financiers et humains, qui sont communs à l'ensemble des laboratoires du CNRS et autres EPST et sur lesquels nous ne reviendrons pas, plusieurs entraves à la progression de l'ensemble des différentes disciplines de la section ont été identifiées de façon récurrente. En premier lieu il existe un constat unanime que les procédures liées aux réglementations d'éthique des approches expérimentales chez l'homme et chez l'animal, présentent une complexité et des délais de

traitement qui impactent de façon significative l'avancée des projets de recherche. Par exemple, des contraintes entourent aujourd'hui les recherches, pourtant non-interventionnelles, utilisant des techniques de recueil avec capteurs extracorporels (EEG, EMG...) qui sont très couramment employées en psychologie. Ainsi l'ambiguïté concernant la qualification par les comités d'éthique des protocoles de recherche strictement comportementaux en psychologie est une source d'incertitude (les CER renvoient parfois vers un CPP) qui pèse sur la mise en œuvre de la recherche. Si tout le monde s'accorde sur la nécessité d'une recherche cadrée éthiquement, il devient crucial que ces contraintes administratives soient dotées d'une certaine flexibilité nécessaire à une recherche scientifique expérimentale réactive, dans un contexte de forte compétition internationale, et que, pour le moins, il y ait un renforcement des structures d'accompagnement mises en place par le CNRS et les autres EPST.

Plusieurs responsables s'inquiètent que les moyens très contraints des universités ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante à l'ensemble des besoins de la communauté tout en relevant le rôle crucial et la mission de formation des laboratoires et des chercheurs auprès des jeunes étudiants chercheurs, dans leur spécialisation, au delà du socle donné par les masters. Il est ainsi proposé de renforcer les formations universitaires axées sur l'interdisciplinarité en favorisant l'accès à une formation en neurosciences d'étudiants formés initialement dans d'autres disciplines (ingénierie, mathématique, physique...) en tenant compte des spécificités propres à chaque site pour former les étudiants et futurs chercheurs potentiels au décloisonnement des recherches menées dans la section. On note également une inquiétude concernant

l'attractivité de filières en psychologie, axées sur les approches expérimentales et cognitives, au profit de cursus perçus comme plus professionnalisant. De façon similaire, les domaines basés sur l'expérimentation animale, qui reste un sujet d'opinion sensible, éprouvent certaines difficultés à attirer des étudiants. Enfin, à ces difficultés de recrutement d'étudiants, dont l'origine peut au final s'expliquer par des perspectives professionnelles réduites, de nombreux responsables s'inquiètent d'un manque d'attractivité vis-à-vis des chercheurs post-doctorants. Une raison probable est le niveau des salaires proposés n'est pas compétitif à l'échelle internationale. Ce constat, qui s'applique probablement à d'autres sections du CoNRS, est particulièrement criant pour les chercheurs formés aux neurosciences computationnelles qui trouvent dans les groupes privés exploitant l'Intelligence Artificielle des perspectives de carrières beaucoup plus lucratives.

Enfin, la section 26 s'associe aux différentes motions déposées par le Comité National et s'inquiète de la détérioration des conditions de la recherche dans ses laboratoires. Cette dégradation concerne les moyens humains insuffisants en termes de support à la recherche et également la diminution des subventions récurrentes au profit de financements par appels d'offres qui s'avèrent insuffisants au regard du faible taux de réussite. Enfin, la section 26 dénonce la diminution dramatique du recrutement de chercheurs CRCN qui conduira à un départ de ces jeunes chercheurs vers d'autres pays ou d'autres carrières et qui participera inexorablement à l'appauvrissement de la recherche dans les domaines de l'ethologie, de la psychologie et des neurosciences.

ANNEXE 1

En complément de ce rapport il est conseillé de consulter l'ouvrage «Le Cerveau en Lumière» aux éditions Odile Jacob édité à l'initiative de l'ITMO Neurosciences, Sciences Cognitives, Neu-

rologie, Psychiatrie (Dir B. Poulain et E. Hirsh) de l'Alliance Nationale pour les Sciences de la Vie et de la Santé (AVIESAN).

SECTION 27

RELATIONS HÔTE-PATHOGÈNE, IMMUNOLOGIE, INFLAMMATION

Composition de la section

François TROTTEIN (président de section), Jean DAVOUST (secrétaire scientifique), Élisabeth BERNARDO, Nicolas BIDERÉ, Ulrich BLANK, Mattéo BONAZZI, Christine BOURGEOIS, Yves DENIZOT, Patricia DOUBLET-DAR, Stéphane EMILIANI, Jost ENNINGA, Denis HUDRISIER, Jean-Jacques LAUNAY, Hugues LELOUARD, Évelyne MANET, Ève-Isabelle PECHEUR, Bruno POUVELLE, Olivier SILVIE, Élena TOMASELLO, Abdelilah WAKKACH, Kai WENGELNIK.

Résumé

Les thèmes de recherche abordés par la section 27 concernent les relations hôte-pathogène, l'immunologie et l'inflammation. Le développement et l'homéostasie du système immunitaire, ainsi que sa dysrégulation, l'étude des réponses immunes dirigées contre les agents pathogènes et les tumeurs représentent des thèmes majeurs. De nouveaux mécanismes régissant le contrôle, ou au contraire l'échappement, des agents infectieux et des cellules tumorales ont été identifiés au cours de la dernière décennie. Ces recherches situées à l'interface de plusieurs disciplines ont permis des avancées significatives dans le domaine de la biologie en général et ont conduit à des applications thérapeutiques concrètes dans le domaine de la vaccinologie et des traitements anti-infectieux et anti-tumoraux. Ce rapport

visait à établir de façon non-exhaustive les avancées majeures dans le domaine et à cerner les défis scientifiques et enjeux de la discipline.

Introduction

L'étude des agents infectieux et des mécanismes régulant les relations hôte-pathogène est un axe majeur de la section 27. Le système immunitaire représente chez l'hôte un système de défense en interaction constante avec les micro-organismes qui nous entourent. Les mécanismes régissant ces interactions ont fait l'objet de découvertes importantes au cours des deux dernières décennies. Les retombées de ces recherches pour la santé humaine et

animale sont importantes. Le CNRS a pris en compte depuis longtemps les enjeux liés à cette thématique, tant sur le plan fondamental qu'appliqué.

Les pathologies associées au dysfonctionnement du système immunitaire telles que les pathologies inflammatoires, les maladies auto-immunes et allergiques, et le cancer sont en constante progression. Ces phénomènes sont intimement associés à l'allongement de la durée de vie, aux changements du mode de vie et des habitudes alimentaires, et aux bouleversements environnementaux. Les enjeux sont considérables sur le plan médical, économique et sociétal. L'objectif de ce rapport est de présenter les avancées scientifiques récentes et de cerner les grands défis qui se présentent à nous.

I. Agents infectieux : pathogénicité et interactions hôte-pathogène

L'étude des agents infectieux comprenant virus, bactéries, parasites et champignons fait partie intégrante du périmètre de la section 27. L'importance de ce champ d'étude est illustrée par plusieurs Prix Nobel récents en physiologie et médecine récompensant par exemple la découverte du rôle d'*Helicobacter pylori* dans les pathologies de l'estomac (Marshall et Warren, 2005), la découverte du VIH par une équipe française (Barré-Sinoussi et Montagnier, 2008), ou encore l'identification de composés antiparasitaires (Campbell, Omura et Youyou Tu, 2015). La recherche en microbiologie au sens large est primordiale à plusieurs titres. Les maladies infectieuses demeurent une cause importante de mortalité et de morbidité chez l'homme et l'animal avec un impact économique et environnemental indéniable. Comme illustré ci-après, les recherches menées sur les microorganismes, dont les agents pathogènes, et leurs interactions avec

l'hôte ont conduit à des avancées scientifiques remarquables avec des applications concrètes dans plusieurs disciplines.

A. Agents infectieux, révélateurs des mécanismes fondamentaux du vivant

L'étude des mécanismes infectieux et des interactions hôte-pathogène a permis de mettre à jour des mécanismes fondamentaux sélectionnés au cours de l'évolution des organismes vivants. Les systèmes de défense intrinsèque de la cellule, tels que les récepteurs de l'immunité innée ou les facteurs de restriction, jouent un rôle clé dans la première ligne de défense cellulaire et sont déterminants dans la protection de la transmission inter-espèces d'agents pathogènes. En retour, les pathogènes intracellulaires ont co-évolué pour échapper à ces défenses, comme l'illustre la capacité des virus, bactéries et parasites à mimer et détourner les voies de signalisation cellulaires. Les virus ont également largement façonné les génomes de leurs hôtes au cours de l'évolution et favorisé l'émergence de nouvelles fonctions. Les génomes de mammifères ont en particulier accumulé des millions de séquences rétro-transposées, dont certaines constituent près de 10% du génome humain. Pour échapper aux effets potentiellement délétères de ces séquences endo-rétrovirales, la cellule hôte a développé des mécanismes permettant de contrôler leur expression au niveau épigénétique. Il a été établi que la domestication des protéines d'enveloppe de rétrovirus endogènes a par ailleurs joué un rôle important dans la placentation chez différents mammifères. Un autre exemple est le lien étroit découvert récemment qui existe entre la fonction des senseurs d'acides nucléiques au cours des infections virales et les mécanismes de réplication et réparation de l'ADN.

Les micro-organismes constituent également de précieux modèles pour l'étude de fonctions conservées au cours de l'évolution. Par exemple, l'agent de la maladie du sommeil,

Trypanosoma brucei, possède un flagelle essentiel dont la structure est similaire à celle des spermatozoïdes ou des cils des mammifères, et offre un modèle d'étude de ciliopathies humaines. De même, l'étude d'effecteurs bactériens sécrétés dans la cellule hôte a révélé récemment de nouvelles activités enzymatiques associées à des modifications post-traductionnelles inédites (AMPylation/deAMPylation, phosphocholination/dephosphocholination), qui se sont avérées être critiques pour la transduction du signal chez les eucaryotes.

L'étude fondamentale des microorganismes, dont les agents pathogènes, a permis le développement d'outils importants pour la biologie moderne. Citons-en quelques-uns. L'étude des virus a conduit au développement de vecteurs viraux (Adénovirus, Parvovirus, Rétrovirus, Lentivirus) extrêmement efficaces et largement utilisés notamment pour le transfert de gènes ou la vaccination. Les micro-organismes offrent aussi d'autres types d'outils thérapeutiques, comme les bactériophages pour faire face aux résistances bactériennes aux antibiotiques. Citons aussi le potentiel extraordinaire des bactériocines, des peptides antibactériens produits naturellement par certaines familles de bactéries. L'utilisation des virus oncolytiques dans le cadre d'une stratégie anti-cancéreuse est aussi porteuse d'espoir. Enfin, un autre exemple récent est le système CRISPR-Cas9, initialement découvert dans le cadre d'études fondamentales des réponses innées que développent les archées et les bactéries contre des virus. Celui-ci est devenu un outil puissant d'édition du génome désormais utilisé dans tous les champs de la biologie.

B. Émergence, résurgence et persistance des maladies infectieuses dans le contexte mondial actuel

Le contexte mondial actuel est marqué par la globalisation des échanges, la persistance de zones de conflit et les migrations de popula-

tions, ainsi que par des changements climatiques. Tous ces facteurs ont une répercussion directe sur les agents infectieux et la manière dont ils se disséminent. À cela s'ajoute la crainte d'un détournement d'agents infectieux à des fins de bioterrorisme.

Les virus représentent l'une des causes principales de pandémies touchant plusieurs dizaines de millions de personnes telles que l'infection par le VIH ou la grippe. Certaines maladies infectieuses résistent encore aux mesures de contrôle, comme le paludisme, qui continue de faire des ravages en Afrique, ou la tuberculose. Ces dernières années ont été marquées par une résurgence d'infections virales sous la forme d'épidémies, notamment Ebola en Afrique centrale, Chikungunya, ou encore Zika, classé depuis 2016 en urgence de santé publique internationale par l'OMS. On a aussi assisté à l'émergence de nouveaux virus causant des syndromes respiratoires aigus sévères (SARS-CoV isolé en Chine en 2002, MERS-CoV isolé au Moyen-Orient en 2012, SARS-CoV-2 isolé en Chine en 2019). On voit resurgir des pathologies comme la leishmaniose dans le sud de la France et chez les migrants originaires du Proche Orient, également touchés par la tuberculose. La généralisation des systèmes de climatisation s'accompagne d'une augmentation de la fréquence des infections transmises par voie aérienne, notamment la légionellose.

Les maladies vectorielles posent également un problème de santé majeur, notamment du fait des changements climatiques et de la mondialisation, qui, en modifiant la distribution et en facilitant l'expansion des vecteurs, ont un impact direct sur certaines maladies infectieuses. Le moustique-tigre (*Aedes albopictus*), vecteur de plusieurs virus (Dengue, Chikungunya, Zika), s'est très largement répandu dans le monde, y compris en France métropolitaine. On observe aussi une résurgence de maladies bactériennes comme la maladie de Lyme, transmise par des tiques infectées par *Borrelia burgdorferi*.

Les co-infections jouent un rôle important dans l'évolution des agents pathogènes. C'est le cas par exemple des souches invasives non

typhoïdes de Salmonelles qui, étant apparues en Afrique Australe avant le VIH, ont émergé avec le développement du virus. Inversement, certaines infections bactériennes ou parasitaires induisent un terrain propice au développement de certains virus. Les cas de co-infections par le VIH et les virus de l'hépatite B ou C sont également fréquents, après transmission par voie sexuelle ou sanguine.

L'avènement de nouveaux traitements immunosuppresseurs administrés dans le cadre de maladies inflammatoires et auto-immunes, ou de greffes s'accompagne aussi d'un risque de résurgence de maladies infectieuses. Par ailleurs, la remise en cause des bénéfices de la vaccination conduit à une diminution inquiétante de la couverture vaccinale et à une résurgence des maladies infectieuses comme la rougeole ou la coqueluche, avec des conséquences sévères pour les populations à risque.

C. Réservoirs et mode de transmission des maladies infectieuses

Une question importante dans le domaine de la microbiologie est celle de l'existence de réservoirs cellulaires, tissulaires et animaux pour les pathogènes. Si l'infection par le VIH est désormais contrôlée chez une majorité de patients sous traitement antiviral, le contrôle du réservoir viral est essentiel pour envisager des approches curatives. Cela nécessite une meilleure caractérisation des populations cellulaires constituant ce réservoir et l'élucidation des mécanismes contrôlant à l'échelle cellulaire et moléculaire la formation et la réactivation des réservoirs viraux. À l'échelle tissulaire, les mécanismes de persistance de certains parasites, comme les hypnozoïtes hépatiques de *Plasmodium*, ou les kystes de *Toxoplasma* dans les muscles et le cerveau, restent très mal compris alors que ces formes jouent un rôle important dans la transmission de ces parasites. La moelle osseuse a récemment été identifiée comme un site privilégié pour le développe-

ment des formes sexuées de *Plasmodium*, même si les mécanismes de séquestration du parasite dans ce compartiment restent inconnus. Une meilleure compréhension des phénomènes de portage asymptomatique chez l'homme est également essentielle, car ils jouent un rôle majeur dans la transmission de certaines maladies infectieuses, comme la tuberculose, l'hépatite B, le paludisme ou les méningites bactériennes.

Les réservoirs animaux constituent également un enjeu majeur. Les modifications apportées par l'homme aux écosystèmes ont engendré de profonds changements dans les rapports entre l'homme, les vecteurs, et les animaux sauvages, avec un impact direct sur la transmission de certains pathogènes. On assiste à une augmentation importante du nombre de zoonoses, tels qu'Ebola en Afrique Centrale et la rage en Asie du Sud-Est.

Des études prédictives estiment à plusieurs centaines de milliers les différents virus qui pourraient exister chez les mammifères, notamment chez les animaux domestiques ou sauvages qui constituent des réservoirs à l'origine de transmissions inter-espèces. C'est le cas des chauves-souris qui sont le réservoir du virus Ebola à l'origine d'épidémies foudroyantes de fièvres hémorragiques chez l'homme. On peut également citer des épidémies de paludisme à *Plasmodium knowlesi*, un parasite de singes prévalant en Asie du Sud-Est, ou encore la transmission du MERS-CoV à partir de dromadaires au Moyen-Orient. L'avènement des techniques de séquençage à haut débit (NGS) a permis de mettre à jour la diversité du monde des virus. De nouveaux virus ont été identifiés (Mimivirus, Megavirus, Pandoravirus). La découverte récente de virus géants visibles en microscopie optique et codant pour plusieurs milliers de gènes dont un grand nombre est inconnu, est venue remettre en question la frontière qui sépare les virus du domaine du vivant. Dans le cadre de la mission Tara Océans, 200 000 nouvelles populations virales ont été identifiées dans l'eau de mer.

Les interactions entre communautés microbiennes représentent une problématique émergente, non seulement entre pathogènes

mais aussi avec la flore microbienne commensale, notamment dans le contexte de biofilms associant bactéries et agents fongiques. À cet égard, si le microbiote bactérien a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années, le mycobiote et le virome restent largement à explorer. Les conséquences de la 'cohabitation' entre agents pathogènes, voire même entre pathogènes et flores commensales (intestinales, pulmonaires, cutanées...), doivent être mieux comprises.

D'autres concepts ont émergé ces dernières années, comme la communication intercellulaire lors d'infections par des organismes unicellulaires, notamment *via* la formation d'exosomes. Ce mode de communication joue un rôle dans les phénomènes de régulation génique en réponse à la densité de population microbienne (quorum sensing). Les exosomes sont par ailleurs une piste intéressante pour le développement d'outils diagnostiques dans le contexte des maladies infectieuses.

D. Résistances aux traitements et nouvelles stratégies anti-infectieuses

Ces dernières années ont été marquées par une généralisation des phénomènes de résistance aux traitements, notamment chez les bactéries et les parasites. Dans le cadre des maladies nosocomiales, la transmission de souches bactériennes multi-résistantes est un réel problème pour de nombreuses bactéries (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Serratia marcescens nosocomial*, *Klebsiella pneumoniae*). La contribution des antibiotiques utilisés par l'industrie agro-alimentaire dans l'émergence de certaines résistances doit aussi être prise en compte, dans le cadre d'approches globales (One Health). C'est aussi le cas des sites de production des antibiotiques dans certains pays, où une contamination locale de l'environnement favorise l'émergence de souches microbiennes résistantes aux traitements.

La lutte contre le paludisme a également été marquée ces dernières années par l'apparition de souches de *P. falciparum* résistantes aux dérivés de l'artémisinine, le traitement de première ligne. Très rapidement, des approches de type NGS ont permis d'identifier un marqueur moléculaire (K13) associé à cette résistance, ouvrant de nouvelles pistes pour explorer les mécanismes d'acquisition de la résistance et développer des outils de surveillance. On peut enfin citer la résistance de certains agents pathogènes à la vaccination, comme c'est le cas pour le virus de la dengue, dont certains sérotypes échappent au vaccin pour des raisons qui restent à élucider.

Dans ce contexte, il est primordial de développer une recherche fondamentale pour comprendre les mécanismes d'apparition et de transmission des résistances, et pour développer de nouvelles stratégies anti-infectieuses. Parallèlement aux approches classiques de microbiologie visant à identifier des cibles potentielles, les approches non-biaisées à grande échelle et les criblages à haut débit de banques de molécules, naturelles ou synthétiques, permettent avec une grande efficacité d'identifier de nouveaux antimicrobiens.

E. Apports des nouvelles technologies pour l'étude des agents infectieux et de leur contrôle

Comme de nombreux autres champs de recherche, la microbiologie a très largement bénéficié du développement de nouvelles technologies. En premier lieu, le développement du NGS et d'autres approches Omiques ont permis d'explorer la biologie des agents pathogènes à une échelle sans précédent, fournissant des données sur le génome, l'épigénome, le transcriptome, le protéome et le métabolome des agents pathogènes et des cellules infectées. Les progrès récents de la spectrométrie de masse devraient s'accompagner d'une augmentation significative de la profon-

deur et de la sensibilité des analyses protéomiques. Les approches NGS fournissent désormais des données non seulement sur les souches de laboratoire mais aussi sur des isolats de terrain pour de nombreux pathogènes. Ces études permettent d'identifier des facteurs microbiens associés à la pathogénicité et à la virulence. Elles permettent aussi de mieux comprendre l'évolution des pathogènes, d'appréhender la diversité des souches pathogènes circulant dans différentes régions, et de comprendre comment les réponses immunitaires innées et adaptatives façonnent le polymorphisme viral, parasitaire ou bactérien au cours de l'infection. Ces recherches peuvent notamment être couplées à des approches d'évolution expérimentale, en laboratoire ou sur le terrain, par exemple pour l'observation dans des zones à faible couverture vaccinale du regain de virulence de formes virales atténuées par mutations successives. Grâce au NGS, la recherche systématique de séquences virales dans les cancers ou les réservoirs d'espèces mammifères peut désormais être envisagée.

Les progrès de l'imagerie, aussi bien photonique qu'électronique, ont conduit pour la première fois à visualiser certains processus infectieux. En particulier, la microscopie optique à haute résolution (récompensée par le prix Nobel de Chimie en 2014) permet désormais de visualiser le vivant à l'échelle nanoscopique. Des approches corrélatives combinant microscopie photonique et microscopie électronique permettent un niveau de résolution sans précédent pour étudier les interactions des pathogènes avec la cellule hôte. Des approches de microscopie intravivante, couplées aux modifications génétiques des pathogènes pour les rendre fluorescents ou bioluminescents, permettent de capturer des événements d'invasion et de motilité, y compris chez l'animal. Le développement de la Cryo-microscopie électronique est aussi utile pour étudier la structure moléculaire de systèmes biologiques complexes, notamment la structure de protéines en solution (prix Nobel de Chimie 2017). Cette technologie a conduit à des avancées importantes dans de nombreux domaines de la biologie, y compris celui des relations hôte-pathogène.

Le système CRISPR-Cas9 est désormais une technique très largement utilisée pour l'édition de génome dans tous les champs de la biologie, y compris la microbiologie. Par exemple, le développement de CRISPR-Cas9 chez différents protozoaires (*Plasmodium*, *Toxoplasma*, Trypanosomatidés...) a conduit à de réels progrès dans le champ de la parasitologie moléculaire, permettant par des approches génétiques d'explorer les mécanismes contrôlant la survie, la virulence, la transmission des pathogènes, et les interactions avec l'hôte. Des criblages par CRISPR-Cas9 sont désormais envisageables à l'échelle de génomes entiers. Couplées à l'imagerie à haut débit, ces approches permettent d'explorer à un niveau global les processus infectieux.

Le développement d'outils puissants pour les manipulations génétiques ainsi que de nouvelles approches de biologie synthétique posent cependant des questions éthiques. Les controverses récentes sur la possibilité de reconstituer *de novo* de nouveaux microorganismes, potentiellement pathogènes, en sont une illustration. Enfin, les approches omiques sur cellules uniques ont connu un essor considérable ces dernières années. Ce type d'approches permet d'explorer à l'échelle de la cellule l'influence d'une infection sur les voies de signalisation ou le métabolisme cellulaire. Des études récentes sur cellule unique ont ainsi conduit à mieux comprendre comment *Plasmodium*, l'agent du paludisme, se différencie en formes transmissibles au moustique vecteur.

II. Développement et homéostasie du système immunitaire : régulation et dysrégulation

Le système immunitaire est un système biologique complexe faisant intervenir de nombreuses populations cellulaires ainsi que de

nombreux facteurs offrant une multitude de sujets d'études et de cibles thérapeutiques potentielles. Les réponses immunitaires sont à la fois de nature innée, rapides et peu spécifiques, et de nature adaptative, plus lentes, extrêmement spécifiques et dotées d'une mémoire à long terme. Cette mémoire est à la base de l'efficacité des vaccins. Lors de toute intrusion de pathogènes ou de tout traumatisme cellulaire et tissulaire, les constituants du système immunitaire s'activent rapidement impliquant des phénomènes de prolifération cellulaire doublés de mécanismes de contrôle très précis. Des études approfondies portant sur la régulation des réponses immunitaires ont permis des avancées spectaculaires dans les domaines de l'immunothérapie anti-tumorale, de la vaccinologie et des pathologies inflammatoires et auto-immunes.

A. Origine et développement du système immunitaire

Au cours de la dernière décennie, les études du développement et de l'homéostasie du système immunitaire ont conduit à des découvertes importantes dont les applications potentielles dépassent le simple cadre des maladies infectieuses, des maladies inflammatoires chroniques et du cancer. Le système immunitaire assure en effet le maintien de l'intégrité de l'ensemble de l'organisme tout au long de l'existence, se traduisant par un essor remarquable de la discipline à l'interface avec les neurosciences, la nutrition, le métabolisme, la physiologie et la microbiologie. Le système immunitaire possède de multiples mécanismes de défense différemment sollicités selon la nature des éléments perturbateurs rencontrés tels que les agents infectieux, cellules tumorales et tissus transplantés. Il est également impliqué dans les désordres inflammatoires, auto-immuns et allergiques ainsi que dans les pathologies cardiovasculaires et neurologiques. Le développement et l'homéostasie du système immunitaire dépendent de la colonisation des muqueuses (appareil digestif,

poumon) par le microbiote. La perturbation de l'environnement et le changement de notre mode de vie ont des conséquences importantes sur l'homéostasie du système immunitaire. Sa dysrégulation est fréquemment associée à des désordres physiologiques et métaboliques atteignant de multiples organes vitaux (maladies neurologiques, cardiovasculaires et endocrines), avec un impact important sur la qualité de vie et une incidence économique indéniable.

Pendant la vie fœtale, des signaux émanant du système nerveux initient de multiples interactions entre cellules hématopoïétiques et cellules mésenchymateuses générant les ébauches des organes lymphoïdes. Les cellules du système immunitaire se différencient à partir des cellules souches hématopoïétiques multipotentes et se développent au cours de l'embryogénèse à partir de zones appelées « endothélium hémogénique ». Le premier organe immunologique embryonnaire est la vésicule vitelline relayée par le foie fœtal, puis la moelle osseuse. Certains lignages cellulaires, comme les macrophages et cellules de la microglie, les mastocytes du derme ou les lymphocytes T $\gamma\delta$ et les cellules de Langerhans de l'épiderme sont d'origine embryonnaire et en partie renouvelés par des précurseurs sanguins à l'âge adulte. La différenciation des cellules hématopoïétiques ainsi que leur analyse fonctionnelle au cours des réponses inflammatoires représentent un nouvel axe de recherche très prometteur. Il a également été établi que les cellules stromales interagissent de façon permanente avec les cellules lymphoïdes et myéloïdes. Ces interactions sont à l'origine de l'initiation des réponses immunitaires adaptatives et par là même des réponses aux pathogènes et aux vaccins. L'apport de l'imagerie photonique a été déterminant dans ces découvertes.

B. Développement des compartiments lymphocytaires

Le développement et la diversification des lymphocytes, composants essentiels du sys-

tème immunitaire adaptatif, font l'objet de recherches intenses, qu'elles soient en relation avec les réponses aux tumeurs ou aux pathogènes et vaccins, mais aussi en relation avec des proliférations lymphocytaires anormales dans le cas de lymphomes. L'analyse à grande échelle de la diversité des répertoires des lymphocytes B et T, rendue possible par l'accès aux méthodes de séquençage rapides, est activement poursuivie. Ces nouvelles technologies permettent à présent d'étudier avec précision l'évolution dans le temps des réponses immunitaires ainsi que les mécanismes fondamentaux de génération et de diversification des répertoires lymphocytaires B et T. Un point remarquable concerne les mécanismes de contrôle de ces répertoires évitant toute expansion lymphocytaire intempestive vis-à-vis des constituants de l'organisme, dénommée « tolérance au soi ». Il s'avère qu'une composante cruciale de lymphocytes T régulateurs exprimant le facteur de transcription Foxp3 acquiert rapidement au cours de leur développement dans le thymus, des fonctions suppressives indispensables au contrôle des réponses auto-immunes. Ces lymphocytes T régulateurs représentent de véritables « gardiens » de l'homéostasie pour l'ensemble du système immunitaire. Leur mode d'activation et leur implication dans de multiples pathologies infectieuses, tumorales et auto-immunes, font l'objet de recherches fondamentales et cliniques susceptibles de conduire à des applications très importantes.

Un niveau additionnel de complexité est lié au rôle que joue le système immunitaire dans la régénération et la réparation de tissus et organes (muscle squelettique et cardiaque, cerveau, foie...), en interagissant directement avec les cellules souches tissulaires. Ainsi, les macrophages tissulaires mais aussi les neutrophiles infiltrants sont capables de régénérer ou réparer des tissus et des organes. L'implication de la composante lymphocytaire dans la réparation tissulaire est encore peu abordée. Il apparaît que les lymphocytes T régulateurs sont également présents au contact des cellules souches tissulaires du muscle squelettique et participent à la régénération musculaire post-traumatique. Il apparaît également que les cel-

lules lymphoïdes innées protègent les tissus et sont impliquées dans la réparation des épithéliums. Les travaux d'interface entre la régulation des réponses immunitaires et la réparation tissulaire sont promis à un grand avenir.

Les technologies modernes ont fait émerger de nouveaux concepts dans le domaine de l'immunologie. Ainsi, la combinaison de multiples technologies d'analyses au niveau de la cellule unique (scRNAseq, code-barres cellulaires, cytométrie de flux, CyTOF, microscopie) a révélé une hétérogénéité cellulaire et une plasticité fonctionnelle insoupçonnées, qu'elles soient au niveau des cellules de l'immunité innée ou des compartiments de cellules lymphocytaires. Ainsi de multiples sous-populations cellulaires, aux fonctions parfois opposées, ont été caractérisées. Les approches modernes ont permis d'affiner la connaissance des cellules immunitaires à l'échelle des cellules uniques. On sait aussi maintenant, grâce à ces nouvelles technologies, qu'une cellule peut totalement changer de comportement selon l'environnement dans lequel elle se trouve.

C. Homéostasie du système immunitaire et rôle du microbiote

Depuis quelques années émerge le concept de niche et d'éducation programmée des cellules du système immunitaire. Dans ce contexte, l'importance du microbiote intestinal a été clairement soulignée. Considéré comme un organe à part entière, le microbiote intestinal produit de façon continue une multitude de facteurs (éléments de paroi, métabolites) capables, en diffusant dans le sang, d'orienter le devenir des progéniteurs immuns et de moduler le fonctionnement des cellules immunes. Le microbiote intestinal participe à l'éducation du système immunitaire et cela dès le plus jeune âge. Ainsi, une fenêtre d'opportunité propice à la diversification et à l'expansion du microbiote a lieu chez le nourrisson lors du passage à la

nourriture solide. C'est durant cette période que le système immunitaire mature et génère un ensemble de lymphocytes T régulateurs en réponse à l'expansion et la diversification de la communauté microbienne. Le système immunitaire façonne en retour le microbiote grâce à la production d'IgA, établissant un équilibre et un dialogue permanent. Dans cette fenêtre d'opportunité, la perturbation du microbiote, même transitoire (due à l'utilisation d'antibiotiques), a un impact sur la susceptibilité aux maladies inflammatoires et auto-immunes à l'âge adulte. L'appauvrissement en diversité du microbiote dans les pays industrialisés faisant suite aux changements de mode de vie depuis un demi-siècle tant au niveau de l'hygiène (asepsie), des modes de production (uniformisation/généralisation de l'usage des antibiotiques dans les élevages intensifs, exposition aux polluants) que de la nutrition (aliments transformés, régimes alimentaires riches) a aussi grandement favorisé l'émergence de susceptibilités aux maladies dites modernes telles que les maladies auto-immunes, les allergies alimentaires, l'obésité, le diabète et les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (MICI) mais aussi de façon moins évidente l'asthme, les maladies cardiovasculaires et même certains désordres neuropsychiatriques. Un déséquilibre du microbiote (dysbiose) peut donc être relié à de nombreuses maladies inflammatoires et auto-immunes. Détecter tôt dans la vie cette dysbiose, en décrypter les conséquences immunologiques et mettre au point des procédures permettant de contrôler le potentiel immuno-régulateur du microbiote (prébiotiques et probiotiques, régime alimentaire riche en fibres) afin de prévenir ou d'influer sur certaines pathologies représentent des enjeux cruciaux en termes de santé publique.

Comprendre précisément les interactions entre l'hôte et son microbiote est donc devenu indispensable pour imaginer les nouvelles approches préventives/thérapeutiques visant à instaurer ou restaurer un dialogue microbiote-hôte bénéfique au système immunitaire. Cela nécessite une connaissance approfondie du microbiote, qui est loin d'être complète si on intègre les bactéries rares et

non cultivables, les virus et les champignons, et également de son impact sur les cellules de l'hôte. Ceci nécessite l'intégration d'autres paramètres comme notamment la métagénomique et la métabolomique. Une approche pluridisciplinaire intégrant des thématiques des différentes sections de l'INSB (immunologie, microbiologie, écologie microbienne, métabolisme, physiologie, nutrition, évolution, biologie des systèmes, modélisation mathématique et bio-informatique) apparaît cruciale à cet égard.

III. Immunité anti-infectieuse, thérapies et vaccinologie

L'une des grandes fonctions du système immunitaire est d'éliminer les agents infectieux, tout en assurant l'intégrité des tissus de l'organisme et en évitant les réactions auto-immunes délétères. Un axe important de la section 27 consiste à analyser le rôle du système immunitaire lors de l'infection. Ces recherches ont été à l'origine du prix Nobel de Médecine attribué en 2011 à l'un des chercheurs de la section (Jules Hoffmann), pour ses travaux pionniers sur les mécanismes innés de reconnaissance entre pathogènes et système immunitaire. Ces recherches visent à caractériser les mécanismes sous-tendant l'activation du système immunitaire inné, la genèse des réponses adaptatives cellulaires et humorales effectrices et enfin, la mise en place et le contrôle des processus de réparation tissulaire ainsi que le retour à l'homéostasie du système immunitaire. Ces recherches sont essentiellement basées sur l'utilisation de modèles expérimentaux pertinents ainsi que sur des données issues de la recherche clinique. Elles ont permis d'identifier des points de contrôle défaillants grâce notamment à l'analyse de déficiences génétiques liées à des susceptibilités particulières et d'envisager de nouvelles

approches thérapeutiques ciblées. Ce type de recherches en immunogénétique doit clairement être poursuivi et le positionnement de la France est tout à fait remarquable dans ce domaine.

A. Immunité anti-infectieuse

La phase initiale de l'infection, qu'elle soit par voie muqueuse (voie d'entrée principale des pathogènes) ou systémique, met en scène de nombreux acteurs cellulaires, longtemps étudiés séparément mais dont les interactions impactent la nature de la réponse. Un nombre croissant de sous-populations immunitaires a été caractérisé, notamment dans les muqueuses. Leur importance physiologique, leurs capacités fonctionnelles et leurs origines sont en cours d'élucidation. Les cellules résidentes des muqueuses (cellules épithéliales, mastocytes, cellules dendritiques, macrophages, cellules lymphocytaires innées et lymphocytes T non-conventionnels) sont les premières à interagir avec les pathogènes et sont responsables du recrutement des cellules immunitaires issues de la moelle osseuse. Ces processus de recrutement sont finement régulés et des études par imagerie dynamique *in vivo*, bien qu'encore difficiles à réaliser pour certains organes comme le poumon, sont très instructives. L'étude de la fonction des populations cellulaires et des effecteurs moléculaires (cytokines, peptides antimicrobiens, etc.) repose sur le développement d'outils particulièrement sophistiqués. Citons la création de multiples modèles de souris permettant d'inactiver de façon conditionnelle un effecteur moléculaire dans une cellule particulière. Bien que l'utilisation des modèles *in vitro* doive être poursuivie, car ils permettent notamment l'identification des mécanismes moléculaires, les modèles *in vivo* restent indispensables. Il est en effet crucial de considérer le fonctionnement des cellules immunitaires non seulement dans leur environnement tissulaire mais aussi dans l'organisme entier. Le développement conjoint d'études sur tissus organoïdes permet des avancées rapides dans le domaine. Soulignons

également que des efforts importants ont permis d'établir une carte de correspondance détaillée entre les constituants du système immunitaire murin et les équivalents chez l'Homme, ouvrant ainsi le domaine vers de futures applications thérapeutiques. Toutes ces données dépassent bien sûr le domaine de l'immunité anti-infectieuse et ont de nombreuses applications.

1. Communication inter-organes et immunité

Vu la spécialisation des réponses immunitaires mises en œuvre dans chaque organe et leurs interrelations, l'étude de l'intégrité de l'organisme face aux désordres infectieux devient un sujet central. De nombreuses études ont en effet démontré l'importance de la communication inter-organes au cours des processus infectieux. À titre d'exemple, l'axe moelle osseuse-poumon est capital (myélopoïèse) dans l'élimination des pathogènes pulmonaires. L'axe intestin-poumon est également critique dans les mécanismes de défense dirigés contre les infections respiratoires virales, bactériennes et fongiques. En effet, le microbiote intestinal, grâce à la diffusion de composants de paroi ou de métabolites, est capable d'armer à distance les cellules immunitaires du poumon, leur conférant ainsi une capacité accrue à éliminer les pathogènes. Ces découvertes posent des questions intéressantes sur l'influence des variations de la composition du microbiote sur les mécanismes de défense. De nombreuses équipes tentent de mieux comprendre ces phénomènes qui dépassent le simple domaine des infections, avec comme objectif final de proposer à terme de nouvelles stratégies de prévention basées sur la manipulation du microbiote intestinal.

2. Co-infections et comorbidité

Un second domaine d'intérêt, à la fois fondamental et clinique, concerne les co-infections et la comorbidité. De nombreuses pathologies sont en effet associées à des co-

infections ou des surinfections, ce qui complexifie les moyens de lutte. L'infection par le VIH provoque des dysfonctionnements du système immunitaire qui se traduisent par le développement d'infections bactériennes, parasitaires ou fongiques opportunistes, souvent létales. Il a été montré que le virus de la grippe induit des effets délétères sur les mécanismes de défense, ce qui favorise les surinfections. Les infections bactériennes, dont la tuberculose, et parasitaires (malaria, leishmaniose) peuvent également créer un terrain propice au développement d'infections secondaires. Ces situations d'infections multiples sont activement étudiées malgré la complexité des modèles expérimentaux à mettre en œuvre. Le but de ces recherches consiste non seulement à mieux comprendre les phénomènes d'immunosuppression induits par la primo-infection mais aussi à identifier les facteurs moléculaires de virulence ou de restriction qui sont spécifiquement impliqués dans l'émergence des co-infections ou des surinfections. Ces recherches pourraient conduire à la découverte de nouvelles cibles thérapeutiques.

Un autre sujet d'importance concerne les effets de la comorbidité associée aux maladies infectieuses. Les désordres métaboliques tels que le diabète et l'obésité, ou inflammatoires telles que les pathologies obstructives chroniques du poumon ou l'asthme, augmentent fortement la susceptibilité aux infections, conduisant ainsi à l'exacerbation de la pathologie. Un lien avec le diabète de type 2 a été fortement suspecté pour la tuberculose, comme pour l'hépatite C. Le mode de vie moderne incluant le changement des habitudes alimentaires, le tabagisme, le stress ainsi que l'influence du contexte environnemental et des pollutions contribuent fortement à ce phénomène. L'inflammation à bas bruit liée à l'âge favorise également les infections. Là encore, les recherches effectuées dans ces domaines nécessitent des approches interdisciplinaires, couplées à la mise en place de modèles expérimentaux adaptés, à l'accès à des études de recherche clinique ciblées et à la mise à disposition de technologies de pointe.

B. Nouvelles stratégies thérapeutiques anti-infectieuses ciblant l'hôte

Le traitement des infections se fait communément à l'aide de médicaments antimicrobiens (antibiotiques), antiviraux et antiparasitaires. Cependant l'émergence de pathogènes résistants comme le *Staphylococcus aureus* résistant à la Methicilline et les souches de *Mycobacterium tuberculosis* multi-résistantes ou ultrarésistantes, a conduit au développement de nouvelles stratégies visant à cibler l'hôte afin de potentialiser le pouvoir des antimicrobiens et d'éviter l'apparition de résistances. À titre d'exemple, l'inhibition de la tyrosine kinase ABL par une molécule utilisée chez l'Homme (l'imatinib ou Gleevec®) permet d'améliorer le traitement d'infections à *Mycobacterium tuberculosis* chez la souris, en combinaison avec des antibiotiques comme la rifabutine. Dans le domaine des infections virales, le midodrine (diltiazem), une drogue ciblant les récepteurs alpha-adrénergiques périphériques et utilisée dans l'hypotension en tant que vasoconstricteur, potentialise les effets antiviraux de l'oseltamivir dans le traitement de la grippe. Ces stratégies pourraient renforcer l'arsenal thérapeutique disponible dirigé contre les agents infectieux. De nouvelles recherches sur des agents immunostimulants et immunomodulateurs soulignent également la possibilité d'effectuer de nouvelles associations avec des approches classiques basées sur l'antibiothérapie. Ainsi l'emploi de facteurs de croissance hématopoïétique comme le M-CSF ou le GM-CSF est susceptible d'améliorer les réponses immunes contre les agents pathogènes. Ces nouvelles thérapies basées sur la mobilisation des cellules de l'immunité sont très prometteuses dans le domaine de la lutte anti-infectieuse. La recherche dans ce domaine doit être activement soutenue afin d'améliorer l'arsenal thérapeutique et contrer l'apparition de pathogènes multi-résistants.

C. Vaccinologie

Les vaccins offrent une protection remarquable contre les maladies infectieuses. Les réponses vaccinales médiées par des anticorps spécifiques jouent un rôle essentiel dans la protection. Cependant, ces réponses sont très variables parmi les individus et de nouvelles méthodologies multi-omiques indiquent que le microbiote joue un rôle important dans l'immunité protectrice induite par le vaccin. L'élucidation des facteurs responsables de l'hétérogénéité des réponses aux vaccins entre individus ou chez certains groupes d'individus tels que les nouveaux nés, les personnes âgées, les patients co-morbides ou immunosupprimés est une priorité absolue.

Les avancées technologiques permettant un suivi en profondeur des réponses immunitaires (ex. séquençage à l'échelle de la cellule unique, analyses multiparamétriques en cytométrie en flux et de masse) constituent sans aucun doute un des moyens de lever ces verrous. La biologie des systèmes appliquée à la vaccinologie a également prouvé sa puissance avec des études princeps révélant non seulement des signatures précoces prédictives de la protection conférée par des vaccins commerciaux (contre la fièvre jaune, la grippe et les infections à pneumocoques et à méningocoques) mais aussi des mécanismes moléculaires inattendus. Par exemple, il a été montré que le vaccin contre la fièvre jaune provoque un stress cellulaire accompagné d'une autophagie qui mène à une meilleure présentation des antigènes viraux aux lymphocytes T CD8⁺ par les cellules dendritiques.

1. Étude des mécanismes fondamentaux

La vaccinologie est un domaine pluridisciplinaire. Elle concerne les vaccins anti-infectieux et, de plus en plus, les vaccins anti-tumoraux. L'immunologie vaccinale vise à identifier des corrélats immunologiques de protection et à étudier les mécanismes moléculaires et cellulaires de l'induction d'une

mémoire immunitaire efficace et durable. On a longtemps utilisé des vaccins dont la composition a été définie empiriquement sans pour autant en comprendre le mode d'action. Certains laboratoires du CNRS élucident ces processus afin d'optimiser *in fine* les procédures vaccinales et à terme de générer des vaccins de nouvelle génération. Cette démarche passe par une meilleure compréhension du développement et du recrutement des répertoires lymphocytaires T et B. La majorité des vaccins actuels procure une protection *via* les anticorps neutralisants dont les titres définissent des corrélats de protection. Toutefois les réponses T participent également au contrôle de l'infection ou du développement tumoral. Notre méconnaissance de l'ensemble des corrélats immunologiques de protection et la faible efficacité des stratégies vaccinales visant à induire des réponses T effectrice et T mémoire représentent des défis majeurs pour la mise au point de vaccins. De même, une meilleure compréhension des mécanismes moléculaires et cellulaires de la réponse innée, et de la différenciation et du maintien de la mémoire lymphocytaire T et B, est nécessaire pour le développement rationnel et optimal de vaccins. La plupart des vaccins sont administrés à distance du site d'entrée du pathogène et vise à induire une réponse humorale protectrice. L'un des enjeux de la vaccinologie moderne consiste à administrer des vaccins dans les muqueuses et à induire des réponses lymphocytaires T CD8 permettant une protection vaccinale efficace contre les virus et autres pathogènes intracellulaires. Les laboratoires de recherche sont bien positionnés en France dans ce domaine et ces avancées seront importantes pour concevoir des vaccins procurant une large protection.

2. Apport des nouvelles technologies

Ces vingt dernières années ont été marquées par les avancées des méthodes de séquençage à grande échelle du génome de nombreux pathogènes. Cette approche a favorisé la découverte de nouveaux antigènes permettant et le développement de vaccins

en utilisant l'approche dite de vaccinologie inverse. La même approche est menée dans le cas de l'optimisation des stratégies vaccinales anti-tumorales. Plus récemment, l'efficacité de la vaccinologie structurale, qui consiste à concevoir des immunogènes en prenant en compte les données de structure, a été démontrée avec le design d'une glycoprotéine de fusion qui induit des anticorps neutralisants et protecteurs contre les infections à RSV (respiratory syncytial virus). Cette stratégie est très encourageante dans la lutte contre d'autres maladies infectieuses en particulier contre l'infection par le VIH/SIDA. Les recherches se concentrent ainsi sur une meilleure compréhension du développement des réponses lymphocytaires B menant à la production d'anticorps neutralisants hypermutés et maturés et la conception de nouvelles générations de glycoprotéines d'enveloppe virale favorisant leur induction. Dans ce contexte, les technologies de production d'anticorps monoclonaux humains offrent désormais la possibilité de caractériser au niveau structural les mécanismes de neutralisation. En dernier lieu, l'optimisation des formulations vaccinales (nanoparticules) et des adjuvants capables d'orienter un type de réponse immune afin de favoriser un sous-type de lymphocytes et des signatures d'expression de cytokines définies (par exemple Th1/Tc1) est en plein essor et devrait prochainement permettre des avancées majeures dans ce domaine.

IV. Stratégies anti-tumorales et renouveau de l'onco-immunologie

Le système immunitaire joue un rôle critique dans la surveillance des tumeurs en assurant la reconnaissance et l'élimination des cellules transformées. Cette propriété, associée à la découverte d'antigènes tumoraux détectés par le système immunitaire, est très largement

étudiée et exploitée dans le cadre des stratégies anti-tumorales actuelles. Des avancées considérables ont été réalisées ces dernières années, non seulement au niveau de la compréhension des mécanismes sous-tendant la détection et l'élimination des cellules tumorales, mais aussi des mécanismes d'échappement vis-à-vis des réponses immunitaires. De façon notoire, l'étude des points de contrôle des réponses lymphocytaires T a permis l'identification et le blocage, à des fins de thérapie anti-tumorale, des interactions régulatrices établies entre les lymphocytes T effecteurs et leur environnement au sein des tumeurs, mais aussi au sein des organes lymphoïdes drainant les tumeurs. Il faut souligner que l'identification de l'un de ces points de contrôle majeur (CTLA-4) résulte de recherches menées dans un laboratoire du CNRS il y a plus de trente ans. Les découvertes fondamentales à l'origine de ces applications en thérapeutique ont été couronnées par le prix Nobel de Médecine et Physiologie attribué à Allison et Honjo en 2018. Ainsi, en levant le «frein naturel» des lymphocytes T, ces nouveaux composants dénommés immune checkpoint blockers, sont capables de stimuler les réponses immunitaires anti-tumorales. Des applications similaires sont envisagées pour réactiver les réponses immunitaires à l'encontre de pathogènes infectieux chroniques. À l'inverse, des stratégies visant à renforcer l'action de ces points de contrôle permettent d'atténuer le rejet immunitaire de tissus greffés chez un receveur. La manipulation de ces points de contrôle permet également le développement de nouvelles stratégies thérapeutiques adaptées aux pathologies auto-immunes et inflammatoires.

A. Rôle du microenvironnement tumoral

Le microenvironnement tumoral est un milieu très complexe favorisant l'échappement de la tumeur vis-à-vis des réponses immunitaires. Parmi ces mécanismes, les lymphocytes T régulateurs exprimant le facteur Foxp3 et les

cellules myéloïdes suppressives jouent un rôle inhibiteur sur les cellules dendritiques et les cellules effectrices. La présence de lymphocytes T régulateurs dans les tumeurs est souvent associée à un pronostic défavorable. Les lymphocytes B régulateurs peuvent également participer aux mécanismes suppresseurs par l'intermédiaire du TGF- β . L'un des champs de recherche actuel concerne l'étude des mécanismes conduisant à l'infiltration intra-tumorale par ces cellules suppressives et de leurs modes d'activation. Un autre axe en plein développement concerne l'étude du rôle immuno-régulateur des cellules stromales (non immunitaires) des tumeurs. La caractérisation des mécanismes régissant le remodelage des différents réseaux de cellules stromales des tumeurs ou des ganglions drainant les tumeurs ainsi que les structures lymphoïdes tertiaires est un enjeu crucial. Un axe récent de recherche concerne également les liens entre l'angiogénèse et la réponse immunitaire anti-tumorale. En effet, au niveau moléculaire, la production de VEGF est à l'origine de l'expansion de cellules myéloïdes suppressives. Alternativement, des traitements par des anti-angiogéniques modulent certains paramètres liés à l'immunosuppression comme les lymphocytes T régulateurs et les cellules myéloïdes suppressives. Enfin, de plus en plus d'équipes s'intéressent à la relation entre microbiote et progression tumorale.

Une meilleure compréhension de l'interaction entre les cellules cancéreuses et le stroma tumoral repose non seulement sur l'identification des cellules du microenvironnement tumoral, mais aussi sur l'étude de leurs caractéristiques morphologiques au niveau tissulaire. Ce défi ne pourra pas être relevé sans avancées technologiques permettant l'analyse à haut débit d'images de biopsies tumorales, l'extraction de données, et une quantification des cellules qui résident dans des échantillons tissulaires. La microscopie multi photonique et la microscopie à haute résolution sont particulièrement adaptées à l'analyse de la complexité tumorale. Le développement d'outils bio-informatiques, dont la création de banques de données multiparamétriques en cancérologie et des logiciels d'analyses dédiés, est indispen-

sable. De tels projets de biologie intégrative devraient permettre de mieux comprendre la complexité du microenvironnement des tumeurs *via* l'identification des différents paramètres immunitaires associés à la survie des patients, et la généralisation de l'immunoscore dans la classification des cancers. Ce niveau d'automatisation permettra aux chercheurs d'identifier des interactions cellulaires, des signatures complexes, et de nouveaux biomarqueurs qui seront tous essentiels au développement d'immunothérapies innovantes.

B. Développement croissant de l'immunothérapie

Les avancées récentes dans notre compréhension de la régulation des réponses immunitaires ont permis l'émergence de nouvelles immunothérapies anti-tumorales basée sur l'emploi des «immune checkpoint blockers» (prix Nobel en 2018, Allison et Honjo). Citons par exemple les anticorps monoclonaux ciblant des antigènes tumoraux ou des points de contrôle immunitaires tels que CTLA-4, PD1 et PDL1. De plus, le transfert adoptif de lymphocytes T modifiés par transfert de gènes codant pour des récepteurs chimériques spécifiques d'antigènes tumoraux dénommés CAR T cells, est aussi en plein développement. Cette avancée biotechnologique est directement issue des connaissances fondamentales acquises sur l'activation lymphocytaire T et permet la conception de nouvelles stratégies d'immunothérapie par infusion de cellules lymphocytaires tueuses spécifiques.

L'immunothérapie du cancer a un impact médical, sociétal et économique considérable. De très nombreuses études visent actuellement à identifier de nouvelles cibles moléculaires et à cerner les synergies possibles entre stratégies de vaccination anti-tumorales et nouvelles immunothérapies basées sur le blocage des points de contrôle. Il faut cependant souligner que ces nouveaux traitements peuvent exercer des toxicités de nature auto-immune importantes dues à

la dérégulation de l'ensemble des réponses immunitaires chez l'hôte. Un ciblage et une activation spécifique des lymphocytes dirigés contre les tumeurs sont absolument requis pour améliorer l'efficacité et diminuer les effets secondaires de ces nouveaux traitements.

La conception de traitements anti-tumoraux sélectifs représente un défi important dans le domaine de l'immuno-oncologie. L'élucidation des mécanismes effecteurs et immunosuppresseurs et l'identification des cibles antigéniques provenant des tissus tumoraux, reconnues par les compartiments lymphocytaires effecteurs et régulateurs permettront des avancées majeures dans ce domaine. Le système immunitaire forme un tout et il est évident que les découvertes réalisées dans le cadre d'une application particulière éclaireront tous les domaines allant de l'immunité infectieuse et anti-tumorale à l'auto-immunité, l'inflammation et l'allergie.

V. Pathologies associées à la dysrégulation du système immunitaire

Les pathologies associées à la dysrégulation du système immunitaire comme l'asthme et les maladies auto-immunes, sont en pleine expansion, un phénomène notamment lié à notre mode de vie et aux facteurs environnementaux. Mieux en comprendre les causes passe par une connaissance parfaite des mécanismes fondamentaux régulant la réponse immunitaire.

A. Contrôle et dysrégulation de la réponse immunitaire et maladies associées

L'efficacité de la réponse immunitaire repose, d'une part, sur sa capacité à répondre

à un large spectre d'antigènes étrangers à l'organisme comme ceux produits par les agents pathogènes et, d'autre part, à éviter l'auto-réactivité et l'émergence de maladies auto-immunes. Cet équilibre peut se rompre sous l'influence de nombreux facteurs endogènes et exogènes (environnementaux). Les bases moléculaires et génétiques de la tolérance dite «centrale», acquise au moment du développement lymphocytaire T dans le thymus et permettant l'élimination et le contrôle des cellules T auto-réactives, ont été précisées. Ces recherches ont permis d'identifier des cibles clefs, dont la mutation peut conduire à des pathologies auto-immunes. À titre d'exemple, la mutation du gène AIRE est associée à un défaut d'élimination des lymphocytes T auto réactifs, conduisant ainsi au développement de maladies auto-immunes (APECED). D'autres processus de régulation du système immunitaire peuvent être altérés et conduire à des pathologies. Les avancées les plus marquantes ont été apportées par la découverte des mécanismes sous-tendant le développement des sous-populations cellulaires (Th1, Th2, Th17, TFH, Treg, Breg, etc.). Celles-ci sont capables de finement réguler la fonction des lymphocytes effecteurs. L'altération de ce processus contribue à l'émergence de désordres immunitaires. Par exemple, les lymphocytes T auxiliaires de type 1 (T helper 1) sont bénéfiques pour éliminer les pathogènes intracellulaires mais un déséquilibre Th1 favorise les maladies auto-immunes comme l'arthrite ou le diabète. Inversement, une activité excessive des cellules Th2 est associée au développement de maladies allergiques, dont l'asthme, alors que les cellules Th17 favorisent elles certaines pathologies inflammatoires et auto-immunes. C'est dire l'importance des processus régulant cet équilibre entre sous-populations immunitaires aux fonctions différentes, parfois opposées. À ce titre, l'infusion de faibles doses d'interleukine 2 semble prometteuse pour le traitement de pathologies auto-immunes, car elle permet une mobilisation accrue des lymphocytes T régulateurs. Cette cytokine active une boucle de rétrocontrôle naturelle du système immunitaire et mobilise les fonctions immunosuppressives des lymphocytes T régu-

lateurs, propices au traitement de certaines maladies auto-immunes.

De nouvelles approches comme l'imagerie dynamique intravivante et l'analyse de séquences sur cellules uniques couplées à des analyses bio-informatiques poussées permettent de mieux appréhender la dynamique et l'hétérogénéité des cellules immunitaires (dont les Th) et de leurs fonctions dans le contexte du microenvironnement tissulaire. La spécialisation des lignages lymphocytaires dépend d'un nombre limité de facteurs de transcription (par exemple *Foxp3* pour la spécialisation des lymphocytes T régulateurs), de facteurs exogènes (facteurs de croissances, microenvironnement) ou épigénétiques. À l'avenir, il sera crucial de connaître leurs partenaires ainsi que le programme moléculaire qui régit leur génération et leur adressage tissulaire. *In fine*, cette recherche fondamentale permettra de mieux comprendre les pathologies associées aux désordres immunologiques.

De nouveaux domaines, comme l'immuno-métabolisme, sont en train de prendre une place considérable dans cet axe de recherche. Le développement de nouveaux modèles biologiques mais aussi informatiques et mathématiques permettant de donner une vision globale et intégrée du rôle de chaque lignée immunitaire au sein des organes et de l'organisme entier est nécessaire. Ces approches apporteront des éléments nouveaux sur la nature des déséquilibres à l'origine des maladies et procureront une base solide pour le développement de nouvelles stratégies thérapeutiques.

Certaines pathologies fréquentes comme le diabète de type 2, la sclérose en plaques ou l'asthme sont associées à des facteurs environnementaux et, en particulier, à la composition du microbiote des patients. Comme évoqué plus haut, l'élucidation des mécanismes par lesquels le microbiote intestinal régule la réponse immunitaire est l'un des grands défis à résoudre pour les immunologistes. Là encore, les progrès viendront de l'utilisation de stratégies à haut débit, permettant d'analyser le microbiote dans son ensemble, mais également du développement de modèles biologiques capables d'évaluer le rôle des éléments

microbiotiques sur le système immunitaire. Les implications de ces travaux pourraient dépasser le cadre des désordres immunitaires et concerner également certaines pathologies psychiatriques et cancéreuses.

B. Génétique et désordres immunitaires

Des études épidémiologiques ont clairement mis en évidence le caractère familial fréquent des désordres immunitaires. Les approches génétiques, qui ont permis d'élucider les bases moléculaires de certains déficits immunitaires monogéniques comme les syndromes de Bruton, d'Omenn ou HIGMs, doivent maintenant être adaptées à l'analyse des maladies auto-immunes, plus complexes, souvent polygéniques et multifactorielles. Des données nouvelles sur les gènes qui régulent les réponses immunitaires aideront à améliorer la prévention et le diagnostic des malades. Par ailleurs, l'élucidation des bases génétiques des patients souffrant d'immunodéficiences primaires a permis la découverte de mécanismes et de facteurs essentiels au développement et à la régulation du système immunitaire. Les immunodéficiences primaires sont des maladies rares mais leur nombre est important puisque actuellement plus de 200 causes génétiques ont été identifiées pour ces maladies. Ces modèles « *in natura* » sont très informatifs pour comprendre le fonctionnement du système immunitaire chez l'Homme et ses interactions avec l'environnement. Récemment, le développement et l'usage des nouvelles techniques d'analyse du génome et sa régulation (séquençages exome, génome entier, transcriptome) ont permis des progrès importants et rapides dans la compréhension des bases génétiques de ces maladies, mais ils ont aussi révélé sa complexité dans un nombre croissant de pathologies. Ces nouveaux outils produisent des quantités massives de données qui nécessitent de nouvelles compétences professionnelles pour leur traitement et leur analyse. Le développement du système CRISPR-Cas9

qui permet l'obtention rapide de « knock-out » cellulaires, va fortement contribuer à une meilleure connaissance des pathologies associées aux désordres immunitaires.

L'étude des immunodéficiences primaires a permis non seulement des progrès importants en immunologie fondamentale mais elle a participé et contribué de façon essentielle à de nombreuses avancées diagnostiques et thérapeutiques (incluant les nouvelles thérapies cellulaires et géniques). De nombreuses études indiquent l'importance des facteurs génétiques, familiaux et environnementaux dans le déclenchement de pathologies tels que l'asthme, les maladies inflammatoires de l'intestin et les maladies auto-immunes. Ces facteurs sont mal connus pour le moment mais les nouvelles techniques d'analyse du génome vont permettre dans un avenir proche une meilleure compréhension du rôle de ces facteurs dans ces désordres immunitaires.

C. Les hémopathies, corollaire de désordres du système immunitaire

La mise en place du système immunitaire est un processus complexe qui permet à un nombre limité de cellules souches hématopoïétiques de produire l'ensemble des cellules effectrices impliquées dans la réponse immune. Cette complexité permet de faire fonctionner un système économe qui exerce ses fonctions s'étendent à l'ensemble de l'organisme. Cependant, les altérations qui surviennent au cours de la différenciation des cellules peuvent bouleverser de nombreux aspects de leur biologie et contribuer à l'émergence de déficits immunitaires ou d'hémopathies malignes. Par exemple, une seule cellule lymphocytaire B passe par plus d'une quinzaine de stades de différenciation pouvant tous conduire à un sous-type de lymphome B. Avec plus de 20 000 nouveaux cas par an, les hémopathies lymphoïdes (dont un quart est représenté par les seuls myélomes B) représentent une part importante de ces maladies et

leur nombre tend à augmenter avec le vieillissement de la population et les conditions et hygiène de vie (alcool, tabac, pesticides et perturbateurs endocriniens). Au cours des 30 dernières années, grâce à la cytogénétique moléculaire, certaines lésions génétiques récurrentes (mutations et translocations chromosomiques) associées à la leucémogénèse ont été identifiées. De façon intéressante, les altérations affectent souvent des gènes impliqués dans le contrôle de la mise en place du système immunitaire. Par exemple, les mutations du facteur de transcription Ikaros sont fréquentes dans les leucémies aiguës lymphoblastiques, celles de BCL6 sont retrouvées dans les lymphomes B et des translocations chromosomiques dérèglent MAF dans le myélome multiple.

Comme souvent, c'est l'étude de la cellule saine qui a mis en évidence les processus conduisant aux translocations chromosomiques impliquées dans la lymphomogénèse B. C'est lors d'un des trois grands « check points » de remodelage chromatinien (avec cassures physiologiques de l'ADN) qui ponctuent la maturation B (recombinaison VDJ, hypermutation somatique, recombinaison isotypique) que peuvent se transloquer les oncogènes à l'origine de la plupart des lymphomes B matures. En utilisant des stratégies génétiques chez la souris (modèles knock-out d'inactivation et knock-in d'insertion), les chercheurs ont validé les fonctions oncogéniques des gènes mutés ou transloqués et généré des modèles précieux de ces pathologies humaines. Plus récemment, le séquençage à haut débit a apporté un éclairage nouveau sur la génétique des hémopathies malignes en donnant accès à l'ensemble des altérations présentes dans les cellules tumorales et en mettant en évidence le phénomène d'hétérogénéité intra-tumorale indiquant que la cellule se cancérisé à la suite d'événements géniques. Ces approches génomiques ont généré une quantité énorme de données dont le traitement nécessitera de lever les verrous suivants. Parmi les nombreuses mutations présentes dans les cellules tumorales, il faut discriminer les altérations essentielles « drivers » des altérations accessoires « passagers ». Cette hiérarchisation des fonctions oncogéniques demandera l'analyse de très grandes cohortes

de patients et la mise au point de tests biologiques *in vivo*. Pour comprendre l'évolution des maladies, il est indispensable de définir les coopérations fonctionnelles des différentes mutations et de caractériser les grandes voies altérées par ces lésions génétiques. Enfin, il est nécessaire de préciser le rôle de l'environnement dans le développement des différentes pathologies. Ces points ne pourront être étudiés que grâce à un changement de paradigme scientifique où les analyses « big-data » et « méta-génomiques » deviendront aussi routinières qu'une simple PCR de génotypage. L'étude des mécanismes responsables de la progression des hémopathies lymphoïdes permettra, d'une part, d'identifier de nouveaux processus contrôlant la mise en place du système immunitaire, et d'autre part, de développer des stratégies thérapeutiques, voire même préventives, plus efficaces.

VI. Nouvelles frontières et nouveaux défis

Comme nous l'avons vu, les thèmes de recherche abordés par la section 27 « Relation hôte-pathogène, immunologie, inflammation » sont vastes et concernent plusieurs domaines de la biologie en relation de plus en plus étroite avec d'autres disciplines comme la physique, l'informatique et les mathématiques. Les avancées récentes sont majeures et ont conduit non seulement à une meilleure connaissance des organismes vivants en interaction avec leur environnement mais également à des applications thérapeutiques concrètes.

Le système immunitaire représente la première ligne de défense contre les infections et le cancer, constituant deux thèmes majeurs de la section 27. Cependant, il faut considérer les nouvelles frontières de l'immunologie et prendre en compte le fait que le système immunitaire, et son dysfonctionnement, interviennent dans d'autres pathologies comme les maladies

cardiovasculaires, les maladies dégénératives du CNS, les maladies inflammatoires chroniques aux interfaces avec l'environnement (peau, poumon, système digestif) et la régénération tissulaire. Le lien qui existe entre certains pathogènes et certaines maladies neuropsychiatriques ou des cancers illustre aussi la nécessité de mener une recherche à l'interface de plusieurs champs disciplinaires. Enfin, le développement du domaine de la transplantation d'organes, de cellules et à présent du transfert de gènes à des fins médicales repose grandement sur le progrès des connaissances fondamentales acquises sur le fonctionnement du système immunitaire. Éviter le rejet immunitaire de tissus greffés sans altérer les réponses immunitaires de l'hôte receveur reste l'un des défis les plus importants à résoudre pour généraliser ces traitements à un grand nombre de patients.

A. La santé unique et l'interdisciplinarité

Le concept de santé unique (« One Health ») a récemment émergé dans le contexte de mondialisation actuelle, où santé humaine, santé animale et environnement sont intriqués de façon étroite et dynamique, et doivent être étudiés de façon conjointe pour permettre non seulement une meilleure compréhension de la transmission des agents pathogènes mais aussi le développement de moyens efficaces de contrôle. Il en va de même pour les pathologies associées au dysfonctionnement du système immunitaire. Grâce à sa mémoire adaptative et son rôle de maintien de l'homéostasie chez les vertébrés, le système immunitaire joue un rôle essentiel dans la régulation des interactions entre organismes vivants, et représente une composante centrale du concept de santé unique.

Dans ce contexte où une approche de type One Health est essentielle, un défi majeur sera de développer l'interdisciplinarité par le recrutement d'expertises à l'interface de disciplines relevant de l'INSB et de l'INEE, incluant la biologie évolutive, l'écologie, l'éco-toxicologie, la biodiversité et l'environnement. Cette évolu-

tion doit aussi s'accompagner du développement de compétences bio-informatiques nécessaires à des études globales, notamment en métagénomique. Un autre défi de la recherche en microbiologie sera donc de transposer les progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes cellulaires et moléculaires des processus infectieux, en utilisant des isolats plus représentatifs de cette diversité, en tenant compte notamment des réservoirs animaux et environnementaux des pathogènes. Une telle approche One Health est essentielle pour aborder de façon plus pertinente la complexité des relations hôte-pathogène.

Notre mode de vie est en pleine mutation (stress, habitudes alimentaires, décalage horaire, etc.). À cela se superpose le fait que les conditions environnementales (pollution croissante, changement climatique) évoluent rapidement. Il nous faut donc très rapidement nous adapter, voire anticiper, face à ces perturbations majeures aux conséquences complexes. Cela pourra se faire par des approches de prédiction mathématique et par la mise en place de nouveaux modèles d'étude capables de mimer la situation réelle. Là encore, le concept de santé unique et l'interdisciplinarité seront essentiels. Le développement des tissus organoïdes *in vitro* associé aux techniques de micro-fluidique (organs-on-chips) et de collectes de données à grande échelle indique que l'interdisciplinarité sera essentielle pour obtenir des avancées substantielles en termes de bien-être et de santé publique.

B. Les approches à haut débit et les omiques

Les technologies modernes, par exemple l'analyse de la cellule unique (scRNAseq, CyTOF) ont fait émerger de nouveaux concepts dans le domaine des interactions hôte-pathogène et de l'immunologie. L'avènement des technologies Omiques permet désormais de prendre en compte la vraie diversité génétique des agents pathogènes, bien au-delà de souches modèles de laboratoire. L'avènement des

approches à haut débit, notamment de séquençage, permet désormais de générer des données massives, ce qui pose d'importants défis pour la gestion (stockage) et l'exploitation des résultats. En particulier, l'analyse des données impose de développer des approches bio-informatiques et bio-statistiques adaptées, ou des méthodes d'analyse spécifiques pour les approches « single cell ». Afin de pouvoir exploiter les données issues des nouvelles technologies, il est essentiel de renforcer les liens entre la microbiologie, l'immunologie et d'autres spécialités, comme la physique, les mathématiques et l'informatique, et de faire émerger de nouvelles expertises à l'interface de ces disciplines. Si ces nouvelles technologies et ces nouveaux outils nécessitent de nouvelles compétences professionnelles pour leur traitement et leur analyse, les approches plus classiques basées sur le développement de modèles cellulaires et animaux restent essentielles.

C. Importance de la recherche fondamentale non finalisée

La recherche en microbiologie (dont les pathogènes) et en immunologie reste très dynamique en France, notamment au CNRS, et doit être fortement soutenue. Plusieurs actions structurantes ont eu un effet très bénéfique sur des domaines particuliers, comme l'ANRS, qui a permis le développement d'une recherche de pointe sur le VIH et les hépatites virales, ou les Laboratoires d'Excellence en parasitologie, bactériologie, immunologie et inflammation, qui ont largement renforcé les communautés scientifiques travaillant sur ces thématiques. L'INCA, l'ARC et la Ligue contre le cancer ont grandement soutenu les recherches en immuno-oncologie. Ces actions doivent être poursuivies et étendues à d'autres domaines, comme la mycologie notamment. Les groupements de recherche (GDR) doivent aussi perdurer.

On ne peut qu'insister sur l'importance des recherches fondamentales au CNRS, en amont d'applications. En dehors des champs de

connaissance à fort impact médiatique qui concentrent une grande partie des financements actuels (VIH, résistances aux antibiotiques, microbiote), le manque de financement fait peser un risque réel sur le maintien d'expertises uniques qui font la richesse de la Recherche Française, notamment au sein des laboratoires du CNRS. En parallèle, l'effondrement spectaculaire du nombre de postes sur les thématiques de la section 27 depuis 5 ans va à l'encontre du développement important de certains champs ou disciplines de recherche qui émergent depuis quelques années et qui vont encore se développer dans les années à venir. Cet état de fait ne peut que conduire à une baisse de compétitivité des laboratoires du CNRS face à la concurrence mondiale dans les domaines de l'immunologie et des interactions hôte-pathogène.

Depuis plus de 50 ans, les données recueillies chez les malades ont souvent permis d'élucider les mécanismes moléculaires impliqués dans certaines pathologies liées au dysfonctionnement du système immunitaire et, en même temps, de mieux comprendre la mise en place et la régulation du système immunitaire. Inversement, les progrès dans le domaine de l'immunologie fondamentale ont contribué à de nombreuses avancées thérapeutiques. Ce dialogue entre les aspects fondamentaux et physiopathologiques de l'immunité est toujours d'actualité et il nous semble important de soutenir simultanément les recherches consacrées aux deux versants de la discipline. Notre méconnaissance des mécanismes fondamentaux sous-jacents va de pair avec la faible efficacité des stratégies thérapeutiques. La recherche fondamentale associée aux nouvelles technologies et au développement de nouveaux modèles expérimentaux permettront de lever ce verrou.

Les dangers potentiels d'une politique scientifique trop axée sur la recherche appliquée et court-termiste et qui, depuis plusieurs années, freine la créativité des chercheurs, sont réels. Vu sa vigueur actuelle et les préoccupations de la société face aux bouleversements des modes de vie, la recherche fondamentale sur le vivant doit être soutenue indépendam-

ment de l'espoir d'applications immédiates. Des programmes à hauts risques, dont les retombées potentielles nous sont encore inconnues, doivent aussi être encouragés. Les exemples de découvertes issues de recherches non finalisées sont nombreux dans l'histoire de la microbiologie (antibiotiques, système de réparation génique CRISPR-Cas9) et de l'immunologie (inhibiteurs de points de contrôles du système immunitaire). Les avancées technologiques majeures de ces dernières années, auxquelles le chercheur doit constamment s'adapter, permettent d'acquérir une profondeur d'analyse exceptionnelle et devraient à court terme générer de nouveaux concepts. Cette opportunité place le chercheur dans une position nouvelle qu'il ne saura exploiter que s'il dispose de financements substantiels et d'une liberté intellectuelle garantie.

VII. Conclusion

Ce rapport vise à établir de façon non-exhaustive les avancées remarquables réalisées dans le domaine des relations hôte-pathogène, de l'immunologie et de l'inflammation. Il vise aussi à cerner les défis scientifiques et enjeux de la discipline face à l'émergence de nouveaux pathogènes, à la modification des modes de vies et habitudes alimentaires et à l'impact des pollutions et désordres environnementaux. Le renouveau actuel de la discipline repéré depuis une décade, ne fait que s'accroître. Il résulte de l'intégration des connaissances à l'interface avec l'ensemble des Sciences du vivant incluant, la physiologie, la biologie cellulaire, les neurosciences, l'oncologie et les techniques de la santé. La diversification croissante des outils méthodologiques à la disposition des chercheurs représente un second facteur d'unification du domaine. Enfin, l'interface avec le domaine de la santé représente un ancrage sociétal et économique essentiel pour ce champ disciplinaire en plein essor.

SECTION 28

PHARMACOLOGIE-INGÉNIERIE ET TECHNOLOGIES POUR LA SANTE – IMAGERIE BIOMÉDICALE

Composition de la section

Monique BERNARD (présidente de section), Emmanuelle TREVISIOL (secrétaire scientifique), Pascal BIGEY, Catherine BOTANCH, Emmanuel BROUILLET, Christine CHAPPARD, Gisèle CLOFENT-SANCHEZ, Stéphane DEDIEU, Nathalie DONCESCU, Monique DONTENWILL, Jean-Yves JOUZEAU, Nadja KACHENOURA, Brigitte KERFELEC, Florian LESAGE, Nicolas MARIE, Dominique MASSOTTE, Tangui MAURICE, Cécile PERRIO, Michel RIVIERE.

Résumé

La recherche de nouvelles cibles thérapeutiques, de thérapies innovantes et de nouveaux outils diagnostiques et pronostiques est au cœur des travaux des chercheurs rattachés à la section 28. La découverte de médicaments innovants, complémentaires ou alternatifs aux traitements actuels, enjeu constant dans de nombreuses pathologies, conduit à de nouvelles approches en pharmacologie, visant à identifier des molécules plus sélectives ou à développer des ligands multi-cibles dans le cas de pathologies complexes ou encore à repositionner des molécules déjà connues. En parallèle, de nouvelles cibles thérapeutiques sont explorées pour tenir compte du rôle des régulations épigénétiques, du métabolisme, du micro-environnement et/ou pour faire face aux

résistances aux traitements. Par ailleurs, les biothérapies se développent fortement dans l'arsenal thérapeutique de différentes pathologies. Ainsi, les progrès récents en thérapies génique et cellulaire et en régénération tissulaire dessinent de nouvelles perspectives à fort potentiel qui demandent de poursuivre les efforts de recherche et de développement. Il en est de même pour l'immunothérapie, en plein essor, ainsi que pour le développement de nano-objets et de molécules théranostiques permettant à la fois de diagnostiquer et de traiter, notamment dans le domaine du cancer. D'autre part, les avancées en biologie synthétique ouvrent des perspectives prometteuses sur la conception de bactéries génétiquement programmées pour des applications diagnostiques ou thérapeutiques.

Dans l'ensemble des approches, il est indispensable d'avoir les modèles expérimentaux les mieux adaptés à l'étude de la physiopathologie et des thérapies. Ainsi de nouveaux modèles tels que les organoïdes et organes-sur-puce émergent. Ils reposent sur des méthodes innovantes en bio-ingénierie telles que la microfluidique et la bio-impression, mais de nombreux défis restent à relever, ce domaine prometteur soulevant encore beaucoup de questionnements. De ce fait les modèles animaux conservent encore une place importante, notamment pour prendre en compte les relations entre les organes et les études comportementales ou de genre.

Les innovations technologiques irriguent les domaines thérapeutiques et diagnostiques. L'utilisation de sondes implantables se développe pour la détection et l'enregistrement d'informations locales ou la délivrance thérapeutique ciblée. Par ailleurs, l'imagerie biologique et médicale évolue constamment dans toutes les modalités vers de plus hautes résolution et sensibilité pour des explorations précliniques et cliniques de plus en plus performantes.

Dans ces différents domaines, les recherches conduisent à la définition de nouveaux biomarqueurs issus de la biologie et de l'imagerie permettant de comprendre et de suivre le plus précocement possible et avec précision l'évolution de la maladie, ou bien la réponse à un traitement en tenant compte de la variabilité individuelle. Ces développements ont un fort potentiel socio-économique dans le contexte du développement de la médecine de précision. Comme dans d'autres domaines, l'explosion des sciences des données et de l'intelligence artificielle bouleverse les paradigmes et ouvre de nouvelles perspectives.

Introduction

La section 28 du Comité National est tournée vers l'innovation en thérapie et diagnostic

couvrant ainsi des domaines allant de l'identification de cibles thérapeutiques et la pharmacologie à la bio-ingénierie et aux technologies pour la santé. La section relève principalement de l'institut des sciences biologiques (INSB) et de l'institut des sciences de l'ingénieur (INSIS) du CNRS mais couvre également des domaines d'interfaces avec d'autres instituts, notamment la chimie (INC), les sciences des données (INS2I) ou la physique (INP). Associant nouveaux concepts et outils, elle couvre ainsi de nombreux domaines disciplinaires. Les développements thérapeutiques et diagnostiques s'appuient d'une part sur des mécanismes fondamentaux en biologie cellulaire et moléculaire et d'autre part sur les techniques innovantes de la bio-ingénierie telles que la biologie synthétique et l'ingénierie tissulaire ou les développements technologiques en imagerie.

Ce document expose les avancées les plus remarquables et les thèmes émergents dans les domaines de compétence de la section 28 ainsi que les enjeux et défis à relever et leur positionnement en France et au CNRS. Nous distinguons des avancées conceptuelles et d'autres technologiques, néanmoins celles-ci sont étroitement associées à l'instar des différents domaines qui sont organisés ci-après en grandes thématiques englobant les mots clés de la section 28.

I. Pharmacologie/ nouvelles cibles/ thérapies

A. Signalisation, ligands biaisés et agents multi-cibles

Les concepts en pharmacologie évoluent rapidement et l'accumulation des connaissances autour des processus génétiques, moléculaires et physio-pathologiques des maladies

amène à complexifier et diversifier les approches conceptuelles nécessaires à la découverte de nouveaux médicaments véritablement innovants. Une première stratégie consiste à affiner l'action du candidat médicament pour gagner un niveau de sélectivité dans son action pharmacologique. Cet axe privilégie des molécules qui activent sélectivement une voie de signalisation de leur récepteur cible. Il est largement exploré au niveau préclinique, notamment dans le domaine des antidouleurs opiacés, où trouver des alternatives médicamenteuses est absolument nécessaire. En effet, à côté de la voie de signalisation canonique dépendant de l'activation des protéines G, une voie de signalisation dépendant des beta-arrestines a été décrite et associée aux effets indésirables des opiacés. Dans ce cas, des « ligands biaisés » qui activeraient exclusivement la voie des protéines G ne présenteraient pas les effets secondaires liés à la voie des bêta-arrestines. Par ailleurs, le concept d'un rôle fonctionnel des hétéromères formés par l'association de deux récepteurs de types différents gagne en importance et appelle la conception d'un nouveau type de ligands qui les ciblent de façon sélective et sont, cette fois, biaisés en termes de spécificité du récepteur cible. Ainsi, les ligands biaisés, qu'ils agissent comme agonistes, antagonistes ou agonistes inverses, présentent une super-sélectivité, qui redéfinit leur profil pharmacodynamique et peut affecter la dynamique de leur récepteur cible, en termes de voies de signalisation, de trafic intracellulaire et de distribution subcellulaire, d'oligomérisation, de stœchiométrie et/ou de temps d'action, ce qui module in fine leur activité thérapeutique.

Une seconde stratégie, qui peut être vue comme antinomique de la première, consiste à s'affranchir du concept « une maladie, une cible, une molécule » qui a régi la philosophie du développement de nouveaux médicaments pendant des dizaines d'années. Dans le cas de pathologies complexes, comme la schizophrénie ou encore les maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson, Huntington...), différents types cellulaires, différentes voies neuronales et différents systèmes de neurotransmission sont touchés par le processus

pathologique et une molécule sélective montre vite ses limites. Les thérapies combinées, qui reposent sur un ciblage multiple utilisant une combinaison de médicaments agissant indépendamment sur différentes cibles étiologiques d'une maladie, sont déjà utilisées en clinique depuis plusieurs années. Cependant, une combinaison pharmaceutique de plusieurs molécules médicamenteuses soulève de nombreux défis, notamment les complexités associées à des degrés de biodisponibilité, de pharmacocinétique et de métabolisme potentiellement différents, en particulier chez les patients âgés. Des molécules innovantes qui portent dans leur squelette moléculaire les éléments leur permettant d'être vues par au moins deux récepteurs différents comme des molécules mixtes sont aujourd'hui développées. On parle ici de « ligands dirigés vers plusieurs cibles » (MTDL). Ces ligands peuvent incorporer une grande variété de substances telles que des petites molécules, des polypeptides ou des acides nucléiques. Les thérapies combinées ou les MTDL pourront moduler simultanément plusieurs cibles, avec des affinités élevées et des profils d'efficacité et de sécurité supérieurs. Agir de manière synergique sur différentes cibles impliquées ou interférant avec l'étiologie multifactorielle en réseau de la maladie, qu'elle soit séquentielle ou non, devrait entraîner une amélioration clinique réelle.

Une troisième approche consiste à considérer l'organisme en conditions pathologiques pour la conception de nouveaux médicaments. De nos jours, les molécules sont le plus souvent testées exclusivement sur des systèmes cellulaires dans des conditions correspondant à celles d'un organisme sain, et ce, bien que de nombreux paramètres puissent être modifiés en conditions pathologiques. L'affinité des ligands peut par conséquent s'en trouver grandement modifiée et même largement diminuée, avec une perte d'efficacité de l'approche. Une meilleure définition de la condition pathologique s'avère donc indispensable dans l'évaluation des molécules et représente l'un des défis à venir.

Finalement, on observe depuis peu un effort important sur le repositionnement de molécules déjà approuvées par l'autorité de santé pour de nouvelles indications thérapeutiques en raison de la longueur et de la difficulté de générer et de valider de nouvelles molécules mais aussi parce que les effets indésirables sont déjà connus et l'étape d'autorisation de mise sur le marché acquise. Cette nouvelle vision va sans nul doute également influencer sur les recherches précliniques.

B. Nouvelles cibles thérapeutiques

1. Épigénétique

Les recherches fondamentales de cette dernière décennie ont souligné la complexité des mécanismes multiples qui régulent le génome. En particulier, à la complexité de la machinerie moléculaire contrôlant finement la transcription des ARN, s'ajoutent des mécanismes encore mal compris qui modifient l'organisation tridimensionnelle de la chromatine et l'accessibilité au code génétique. Ces phénomènes physiologiques, dits « épigénétiques » incluent notamment la régulation complexe des modifications post-traductionnelles des histones (acétylation, méthylation, ubiquitination...), les modifications de la molécule d'ADN (e.g. méthylation), et l'intervention d'ARN non-codant (ARN longs non codants, ARN circulaires, etc.). La machinerie moléculaire de réparation de l'ADN est étroitement liée aux régulations épigénétiques. Les dérégulations des systèmes épigénétiques sont mises en évidence dans de nombreuses maladies, notamment dans les maladies du système nerveux (neurodégénératives, l'addiction, la dépression...), les atteintes du métabolisme (diabète), le cancer et bien d'autres, surtout dans les pathologies pour lesquelles les cellules souches interviennent. Des résultats pionniers ont été obtenus démontrant la faisabilité d'agir sur ces systèmes pour modifier la pathologie dans des modèles animaux, soulignant le

potentiel thérapeutique que l'étude de l'épigénétique représente, outre l'intérêt en termes de connaissance fondamentale.

2. Métabolisme énergétique

Le métabolisme énergétique reste depuis de nombreuses années au cœur des recherches en physiopathologie. Les exemples les plus frappants sont le ciblage du métabolisme anormal de nombreux types de tumeurs cancéreuses, les anomalies précoces des boucles métaboliques dans le diabète ou les modifications majeures du métabolisme cérébral (et parfois périphérique) dans les atteintes neurologiques comme dans le cas d'épilepsies focales intractables ou la maladie d'Alzheimer. Si l'on pensait dans les années 1990 connaître la majeure partie des mécanismes moléculaires et enzymatiques du métabolisme, un grand nombre de travaux récents ont mis en évidence l'importance de voies métaboliques encore peu explorées, voire inconnues jusqu'alors, qui pourraient constituer une base de connaissances cruciales pour optimiser des thérapies déjà existantes, en cancérologie notamment, ou proposer de nouvelles stratégies thérapeutiques.

3. Microenvironnement et cancer

En cancérologie, en plus de l'intégration des données sur l'épigénétique et le métabolisme, spécifiques des cellules tumorales, les connaissances sur le microenvironnement et les niches de la croissance tumorale vont mener à la définition de nouvelles cibles thérapeutiques. Le rôle important joué par les cellules « normales » (fibroblastes associés au cancer ou CAFs par exemple) dans la progression tumorale et la résistance aux thérapies se précise et apporte de nouvelles propositions thérapeutiques modulant les effets de l'environnement plutôt que de la tumeur elle-même. L'étude des niches métastatiques et la compréhension des mécanismes induits par les cellules tumorales circulantes et le tissu hôte vont également ouvrir de nouvelles perspec-

tives/cibles thérapeutiques. La découverte relativement récente de l'existence de cellules souches tumorales, potentiellement plus résistantes que leurs descendants plus différenciés mais également la mise en évidence d'une grande plasticité entre ces deux types de cellules a complexifié le schéma initial. Les recherches en cours dans le domaine devraient aboutir à la confirmation de cibles multiples qu'il faudra inactiver de façon concomitante ou séquentielle pour espérer éradiquer une tumeur.

4. Repliement anormal des protéines et maladies neurodégénératives

Le repliement anormal de protéines et leur agrégation sont au cœur de recherches actuelles sur la physiopathologie de quasiment toutes les maladies neurodégénératives. La compréhension de ces mécanismes physiopathologiques est un enjeu actuel majeur pour imaginer interférer avec ces protéines pathologiques et ralentir l'évolution inexorable de ces maladies neurologiques.

5. Pathologies infectieuses

Un des défis sanitaires majeurs du XXI^e siècle est l'émergence continue de pathogènes infectieux résistants à l'arsenal thérapeutique actuel. Cette menace a conduit à un changement de paradigme autour de deux concepts prioritaires pour la recherche de nouvelles cibles et stratégies thérapeutiques anti-infectieuses : 1) les thérapies anti-facteurs de virulence du pathogène et 2) les thérapies dirigées vers l'hôte.

Le ciblage des facteurs de virulence vise à rendre l'agent infectieux inoffensif en le « désarmant » de ses capacités offensives sans pour autant entraîner d'altérations des processus métaboliques essentiels. De telles approches, en limitant la pression de sélection pour la survie, ne favoriseraient pas l'émergence de résistance et auraient pour autre avantage d'être « pathogène-spécifiques » et sans effet

indésirable sur le microbiote commensal, contrairement aux antibiothérapies conventionnelles. Toutefois, la recherche et le développement de composés « anti-facteurs de virulence » à haut potentiel thérapeutique exige le renforcement de l'innovation technologique en microbiologie, notamment en lien avec la biologie de synthèse et les nanotechnologies pour la conception de tests de criblages phénotypiques de cibles moléculaires pertinentes non essentielles dans des modèles complexes d'infection (cellules, tissus, organoïdes, organismes...).

À l'opposé, les approches thérapeutiques dirigées vers l'hôte ont pour objectif de moduler la réponse à l'infection soit en exploitant les voies de défenses naturelles de l'hôte (immunothérapie prophylactique et vaccin thérapeutique), soit de façon plus innovante en modulant la réponse physiopathologique délétère associée à l'infection. Ces stratégies basées sur le corpus de connaissances de la physiologie humaine sont particulièrement favorables au repositionnement de médicaments ou de substances actives non exploitées en s'appuyant sur les avancées récentes de la biologie intégrative, de la chimogénomique et de la pharmacologie computationnelle. Ainsi les méthodes in-silico d'IA offrent des opportunités sans précédent d'analyser et exploiter la masse considérable d'informations hétérogènes issues d'approches diverses (ciblées ou globales (« omiques »)) accumulées dans des bases de données relationnelles pour en extraire des signatures complexes (altérations de l'expression de réseaux de gènes, de protéines et/ou de métabolites) de la pathologie infectieuse ou de l'effet de substances actives. L'analyse et la comparaison de ces signatures conduiront à la découverte de nouvelles cibles et au développement de stratégies thérapeutiques innovantes basées sur le repositionnement de composés susceptibles d'inverser la signature pathologique.

Devant le désengagement patent de la R&D de l'industrie pharmaceutique dans le secteur économiquement peu rentable des anti-infectieux, le soutien fort de la puissance publique pour la recherche de nouvelles approches

technologiques couplées aux développements de la pharmacologie intégrative constitue un enjeu essentiel pour faire face à la menace critique de l'émergence de pandémies infectieuses pharmaco-résistantes.

6. Pathologies cardiovasculaires

Le même phénomène est à noter dans le domaine cardiovasculaire, domaine intéressant peu d'industries pharmaceutiques et peu mis en exergue dans les appels à projet, alors même que ces pathologies représentent la première cause de mortalité en France, avec leur fardeau de co-morbidités et d'impact socio-économique. Une cartographie de biomarqueurs s'inscrivant dans les technologies « omiques », de criblage haut débit (criblages de ligands dans des milieux complexes, voire *in vivo* dans des modèles animaux) et de réseaux biologiques reste à développer. Ce champ de recherche rejoint de fait toute la problématique de la modélisation et des analyses de données complexes (« big data ») et permettrait d'ouvrir les perspectives thérapeutiques au delà de celles largement explorées visant à réduire les hyper-cholestérolémies (statines et anticorps anti-PCSK9).

C. Biothérapies

1. Thérapie génique

La thérapie génique au sens large, ou utilisation d'un acide nucléique, ADN ou ARN, en tant que médicament, concept datant d'une quarantaine d'années, a suscité des attentes très importantes mais les résultats des premiers essais cliniques à la fin du XX^e siècle n'ont pas eu l'impact attendu. Il s'en est suivi une période de méfiance et de désengagement des institutions et de l'industrie pharmaceutique, privant le domaine d'une bonne partie de ses moyens. La thérapie génique dépend de deux points clés avec d'une part la mise au point d'outils efficaces de transfert d'acides nucléiques, et

d'autre part, la connaissance fine des mécanismes pathologiques au niveau génétique et transcriptionnel. Les récents progrès technologiques dans ces deux domaines permettent maintenant les premières applications cliniques industrielles comme en atteste la mise sur le marché de six produits de thérapie génique depuis août 2018. Cela donne un nouvel attrait au domaine, dont le potentiel est énorme, et de nombreux développements sont à prévoir sous réserve de renforcer la recherche, notamment sur la chimie des acides nucléiques, les vecteurs d'administration et la compréhension des mécanismes impliqués.

Les acides nucléiques médicaments peuvent être des gènes entiers, des molécules d'ARN ou des oligonucléotides de type ADN ou ARN. La recherche en chimie doit développer des nucléotides modifiés et des ligands permettant la synthèse d'acides nucléiques actifs au niveau cellulaire, reconnus par les processus enzymatiques, moins toxiques et moins sensibles à la dégradation. Cela permettrait, entre autres, le développement de siRNA stables, d'oligonucléotides permettant des réparations d'ARN messenger par trans-épissage, d'oligonucléotides antisens à toxicité réduite et la synthèse *in vitro* d'ARN messagers à longue durée de vie. Ce domaine est actuellement très en pointe et développé principalement par des entreprises anglo-saxonnes, avec des applications en vaccination génétique et en immunothérapie des cancers (des essais cliniques sont en cours). Des oligonucléotides ARN courts de type microRNA capables d'agir sur les mécanismes épigénétiques impliqués dans certaines pathologies sont également une piste intéressante.

Les vecteurs d'administration doivent être améliorés, ceux de la famille des virus AAV sont actuellement les plus prometteurs et les seuls à être commercialisés, mais leur immunogénicité les rend difficiles à ré-administrer. Le développement de vecteurs viraux « furtifs » ou non immunogènes serait un progrès considérable, permettant des administrations répétées et un élargissement des domaines d'applications. Les vecteurs non viraux, utilisés princi-

palement pour les oligonucléotides, sont surtout nanoparticulaires et doivent devenir plus performants en termes de ciblage tissulaire, de durée de vie et d'efficacité de transfection.

Enfin, un point crucial est un effort soutenu de la recherche fondamentale pour une compréhension fine des mécanismes biologiques impliqués, sans laquelle aucune stratégie de thérapie génique ne peut être définie. Des outils tels que le séquençage à haut débit ou sur cellule unique ouvrent la porte à des études cas par cas, et donc à la médecine personnalisée.

2. Thérapie cellulaire

Dans le domaine de la thérapie génique et *ex vivo*, c'est-à-dire des cellules, autologues ou non, modifiées *in vitro* par des vecteurs viraux souvent de la famille des lentivirus, et réimplantées, les applications potentielles sont particulièrement importantes. Les exemples les plus connus sont ceux des cellules CAR (chimeric antigen receptor) dans l'immunothérapie des cancers, ou des cellules CD34+ dans différentes maladies génétiques. Néanmoins, ce concept repose sur la modification génétique de cellules par des lentivirus, et le développement de vecteurs sûrs et de sites d'intégration chromosomique est nécessaire. De même, la révolution de la technologie d'édition de génome CRISPR décuple les possibilités de la thérapie génique cellulaire en raison de sa simplicité d'exécution, mais pose de nombreux problèmes de sécurité (mutations chromosomiques aléatoires) qui nécessitent le développement d'outils fiables.

La thérapie cellulaire, hors thérapie génique *ex vivo*, reste dans bien des domaines une approche très pragmatique pour reconstruire ou pallier un organe trop altéré pour remplir sa fonction lorsqu'une greffe n'est pas réalisable. La recherche dans ce domaine doit relever deux défis majeurs :

- une très bonne compréhension des conditions de survie et de différenciation *in vitro* des cellules souches (natives issues d'em-

bryons ou cellules souches pluripotentes induites (iPSC)) vers le phénotype souhaité.

- une amélioration du taux de survie de ces cellules lors de leur implantation, leur mortalité excessive étant un facteur très limitant du succès de cette stratégie, particulièrement pour les lignées non hématopoïétiques. Une des voies particulièrement intéressante est le développement de supports tridimensionnels enrichis en facteurs de croissance et cellules auxiliaires, sur lesquels sont ensemencées les cellules souches avant implantation.

3. Immunothérapie

Révolution récente mais concept ancien, l'immunothérapie est une approche thérapeutique visant à moduler la réponse immune, en la stimulant ou en la modérant selon le contexte pathologique. Véritable changement de paradigme dans le traitement des cancers grâce aux spectaculaires progrès cliniques obtenus, l'immunothérapie est devenue l'une des approches thérapeutiques les plus prometteuses. Elle a un large champ d'applications notamment dans le traitement de maladies infectieuses (HIV, tuberculose), neurodégénératives (maladie d'Alzheimer) et auto-immunes. Plus récemment, des résultats très encourageants ont été obtenus dans le domaine cardiovasculaire, notamment par le ciblage de la composante inflammatoire de l'athérosclérose afin de réduire le risque de rupture des plaques d'athérome. Les avancées dans le domaine de l'immunothérapie se concentrent sur : (i) le développement de la biologie intégrative et une compréhension accrue du système immunitaire et de sa dynamique pour mieux appréhender les interactions entre systèmes nerveux, immunitaire et vasculaire dans les pathologies. Un axe de recherche en pleine expansion concerne le lien entre microbiote intestinal et efficacité de l'immunothérapie ; (ii) l'identification de biomarqueurs dont le taux d'expression serait en lien avec un bénéfice thérapeutique estimé pour personnaliser les traitements ; (iii) une meilleure analyse et compréhension des

effets indésirables, des rechutes, des résistances ; (iv) l'exploitation des avancées technologiques (méthodes haut débit, imagerie, « omiques ») pour acquérir le maximum de données biologiques et le développement de la bioinformatique pour déchiffrer, organiser et hiérarchiser les données.

L'immunothérapie est basée sur différentes approches dont principalement les cellules CAR (à partir de lymphocytes T (CAR-T) ou de cellules NK (CAR-NK)) combinant thérapie génique et cellulaire, les vaccins thérapeutiques et les anticorps. Les cellules CAR-T, porteuses d'un récepteur à antigène chimérique, sont jusqu'à présent principalement utilisées pour les pathologies hématologiques malignes. De nouvelles générations de cellules CAR-T visant à améliorer leur efficacité, élargir le spectre d'applications et standardiser la production et l'utilisation (cellules CAR-T « universelles » allogéniques) sont en cours de développement. Les vaccins thérapeutiques ont encore peu de succès (1 seul vaccin en clinique) mais de nombreuses pistes sont explorées et sont prometteuses pour le développement de vaccins préventifs et curatifs. La connaissance accrue de la biologie et de la structure des anticorps a permis de mettre en évidence la capacité de ces molécules à exercer des effets immuno-modulateurs dans certaines conditions (effet de type vaccinal par exemple), ouvrant de nouvelles perspectives thérapeutiques. Les anticorps quant à eux se déclinent en différents groupes selon les cibles. Les anticorps immunomodulateurs (inhibiteurs des points de contrôle de l'immunité) font actuellement l'objet d'une recherche accélérée. Cette révolution en immunothérapie est née des progrès récents dans la compréhension de l'immunité anticancéreuse. Des efforts de recherche considérables sont en cours pour identifier de nouveaux points de contrôle du système immunitaire afin d'élargir non seulement le type de modulation (levée de l'inhibition ou activation) mais également les cibles immunitaires (cellules NK, macrophages...).

Les anticorps monoclonaux thérapeutiques capables d'induire la mort cellulaire connaissent également un essor considérable, notam-

ment grâce aux avancées dans l'ingénierie et le développement d'anticorps bi-spécifiques autorisant des actions plus locales et le recrutement de populations spécifiques. Les anticorps anti-cytokiniques constituent des approches thérapeutiques particulièrement développées pour les maladies autoimmunes et inflammatoires chroniques. Le développement des nouveaux anticorps thérapeutiques, monoclonaux ou conçus par bio-ingénierie, continue de progresser. Il ne faut pas oublier que la France a accumulé beaucoup de retard dans le domaine des anticorps thérapeutiques alors qu'elle en est une des plus fortes consommatrices. Même s'il s'agit de technologies éprouvées, le criblage à partir de banques de fragments d'anticorps de plus en plus performantes doit se poursuivre pour l'obtention de biothérapies ciblant des biomarqueurs nouvellement identifiés. Les biomarqueurs émergent d'études fondamentales sur des mécanismes physiologiques comme l'épigénétique ou le métabolisme énergétique (voir le chapitre sur les nouvelles cibles thérapeutiques) ou encore issus des différentes « omiques » vont certainement renforcer prochainement le champ de la médecine de précision. Des start-ups promouvant la recherche de ligands contre ces nouvelles cibles et intégrant les biotechnologies liées à l'ingénierie des anticorps ont récemment vu le jour et le paysage industriel français s'est réuni autour de cette problématique dans un consortium, MabDesign, qui se veut une aide à la protection des résultats scientifiques et à leur valorisation.

Des verrous persistent, liés aux types d'approches et outils, à la plasticité phénotypique des cellules tumorales comme immunitaires, à la variabilité individuelle et à l'apparition d'effets indésirables moins connus. Une stratification préalable en fonction d'un profil biologique permettrait d'orienter les patients vers des immunothérapies plus adaptées afin d'éviter des surcharges en biomédicament. Ceci implique de poursuivre les études permettant de comprendre la biologie et de déterminer l'état répondeur ou non-répondeur des patients. Les tests compagnons ciblant des biomarqueurs spécifiques de la pathologie sont cruciaux pour la stratification des patients, le

suivi longitudinal de la pathologie et l'établissement d'une corrélation entre l'accumulation sur le site d'intérêt et la réponse thérapeutique.

De nombreux essais cliniques sont en cours sur des combinaisons de traitements associant thérapies conventionnelles (chimiothérapie, radiothérapie) et immunothérapie, susceptibles de faire évoluer les modalités de prise en charge des patients sous immunothérapie.

De nouvelles approches combinant l'immunothérapie et la nanomédecine émergent également. Les nanomédecines peuvent être utilisées pour induire la mort cellulaire immunogénique avec un ciblage plus efficace des drogues ou pour moduler le microenvironnement tumoral. Pour nombre de pathologies, ces dernières années ont vu le développement de nano-objets biocompatibles, ciblés et thérapeutiques. Ce domaine rejoint en cela l'imagerie moléculaire ciblée et le théranostic car ces nano-objets peuvent être créés pour à la fois imager et encapsuler un médicament.

En conclusion, l'immunothérapie est un champ thérapeutique en plein essor et riche en innovations. L'expertise française en immunologie et immunothérapie est particulièrement forte dans le domaine de l'oncologie mais gagnerait à être renforcée dans les autres domaines (maladies auto-immunes, vasculaires, neurologiques, infectieuses).

4. Bio-médicaments synthétiques vivants ou “engineered Live Artificial Biologics” (eLABS)

Bien que l'utilisation rationnelle des bactéries à des fins thérapeutiques remonte à plus d'un siècle, les avancées rapides et remarquables de la biologie synthétique ouvrent de nouvelles perspectives particulièrement prometteuses dans la conception de bactéries « artificielles » génétiquement programmées pour des applications diagnostiques ou thérapeutiques. Ces approches ciblent des pathologies aussi diverses que le diabète, les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, les infections virales ou le cancer et sont illustrées

notamment par l'utilisation de bactéries conçues pour (i) délivrer *in situ* des composés thérapeutiques autrement dégradés dans l'estomac ou le sang, (ii) réduire l'exposition systémique aux médicaments tout en conservant l'efficacité de traitement, (iii) orienter la réponse aux immunothérapies ou (iv) enregistrer *in situ* des signaux transitoires par des méthodes non invasives. Ces approches en rupture tirent profit des capacités intrinsèques de bactéries vivantes d'interagir avec leur environnement en captant des signaux physiologiques et de mettre en place des réponses adaptatives génétiquement programmables pour délivrer des composés thérapeutiques ou des métabolites informatifs. Malgré un nombre d'essais cliniques encore réduit et limité par des aspects de sécurité d'utilisation qu'il reste encore à évaluer, il est vraisemblable que la reprogrammation de bactéries en agents thérapeutiques ou diagnostiques vivants est appelée à se développer dans les années à venir sous l'impulsion des grands laboratoires de recherche.

D. Nouveaux modèles pour la pharmacologie

Le choix de modèles d'études appropriés est un facteur fondamental pour développer de nouvelles cibles thérapeutiques et de nouveaux médicaments. L'utilisation des modèles animaux est sujet à débat pour des questions éthiques sur l'expérimentation animale mais aussi parce que les résultats obtenus sur les modèles animaux ne sont pas toujours confirmés chez l'homme. Les modèles *ex vivo* permettent de comprendre le fonctionnement d'un tissu ou d'un organe sans les interactions complexes avec les autres organes et de travailler dans des conditions contrôlées et des modèles innovants sont développés pour approcher au mieux les conditions d'un tissu ou d'un organe *in vivo* et pour limiter l'expérimentation animale. Néanmoins l'intégration au niveau de l'organisme entier est souvent nécessaire. L'ensemble des modèles sont complémentaires au

développement des approches par modélisation des données biologiques qui dépassent le cadre de la section 28 et ne sont pas traitées ici.

1. Modèles *ex vivo*

Ces 10 dernières années ont vu l'explosion des technologies « omiques » pour caractériser des tissus ou modèles physiopathologiques et les comparer aux tissus et cellules saines. Un énorme progrès a été réalisé en particulier en oncologie pour aboutir à la définition d'entités tumorales hétérogènes et leur classification moléculaire. La complexité de l'écosystème tumoral a été mise en évidence et rend de fait plus difficile la notion de cibles thérapeutiques qui, d'universelles pour une tumeur donnée, deviennent maintenant des caractéristiques de sous populations de patients éventuellement répondeurs à des stratégies thérapeutiques plus ciblées. Les notions d'hétérogénéité intra-tumorale (études en cellule unique) et le passage de la génomique et transcriptomique à la protéomique deviennent des challenges incontournables pour comprendre et traiter les tumeurs les plus agressives et de fait les plus résistantes. La recherche translationnelle doit s'appuyer sur des équipes/collaborations multi-disciplinaires incluant des cliniciens et des bioinformaticiens pour rester au plus près de la réalité clinique et pour évaluer de façon optimale le « big data » généré par les scientifiques ou disponible sur le net. La France souffre d'un manque de formations dédiées pour attirer de vrais mathématiciens et informaticiens vers les challenges de la biologie. L'apport de la biologie des systèmes pour intégrer les données « omiques » en réseaux d'influence plutôt qu'en termes de cibles thérapeutiques isolées est également dépendant de la transversalité des expertises dans nos laboratoires. Pour répondre aux questions posées par l'hétérogénéité tumorale, l'évolution des modèles précliniques proposés est importante. De l'évaluation de thérapies sur des lignées cellulaires établies de longue date en culture monocouche dans des milieux de culture assez éloignés de la physiopathologie, on passe maintenant à de nouveaux modèles incluant des cellules

(dont les cellules souches) et tumeurs dérivées de patients cultivées en 3D et intégrant le microenvironnement, support des cellules tumorales. Les organoïdes (tumoroïdes) semblent les modèles les plus appropriés, à l'heure actuelle, pour prendre en compte ces notions. Les publications dans le domaine sont passées de la démonstration de leur pertinence à leur utilisation dans la recherche de stratégies thérapeutiques. Peu de publications françaises (en position de leadership) font appel à de tels modèles ; il semble que les technologies commencent à être importées dans nos laboratoires par de jeunes chercheurs les ayant utilisées lors de postdoctorats à l'étranger. L'avenir consiste certainement à combiner ces modèles complexes avec de la microfluidique pour aboutir à des organes-sur-puce (OOAC, organ-on-a-chip), véritables plateformes de tests thérapeutiques à grande échelle. Ces tests incluent des combinaisons thérapeutiques basées sur la notion de létalité synthétique (approches génome entier grâce à CRISPR / Cas9 et aux siRNA) et/ou des adressages de molécules au bon endroit, au bon moment grâce à des nanoparticules plateformes intégrant l'imagerie, le ciblage et le médicament. La démarche multi-omiques doit donc être promue pour la pharmacologie.

2. Modèles *in vivo*

Parallèlement au développement actif de modèles substitutifs/complémentaires, les modèles animaux restent importants, bien évidemment en respectant les règles d'éthique. Ainsi la reconstitution d'un système immunitaire humain dans des modèles murins immunodéficients (souris humanisées) suscite beaucoup d'intérêt, notamment en immunothérapie. Les primates non humains sont incontournables pour les études comportementales. Par ailleurs, les données épidémiologiques montrent clairement que le sexe influence l'évolution des pathologies et la réponse au traitement (maladies neurodégénératives, cancer, diabète, sepsis...). Dans le cadre de la médecine de précision et des traitements individualisés, il est important de prendre en

compte ce facteur et de développer des études en amont chez l'animal, notamment chez les rongeurs mâles et femelles. L'analyse systématique des différences de vulnérabilité et possiblement de réponses à des traitements thérapeutiques expérimentaux doit être développée.

3. Prise en compte des relations multi-organes dans les modèles

La nécessité de considérer chaque organe malade comme intégré dans l'ensemble du corps humain est une priorité, non seulement en médecine mais également en recherche. Les multiples relations que le cerveau entretient avec les autres organes, et réciproquement, restent à ce jour le sujet de multiples questionnements scientifiques et médicaux. Par exemple on sait, sans en connaître les mécanismes précis, que l'état de stress conduit, *via* la perturbation de boucles nerveuses, à des manifestations périphériques. Dans ce cadre, un aspect émergent dans certaines maladies neurologiques (Alzheimer, Parkinson, dépression...), les cancers, et bien d'autres pathologies concerne le rôle du microbiote intestinal qui semble influencer l'évolution et/ou l'occurrence des pathologies. L'association entre de grands jeux de données (définition du microbiote par des études protéomiques et transcriptomiques à large échelle) et la caractérisation préclinique de modèles (conditions environnementales ou génétique et manipulations du microbiote) ou clinique de patients (modification du microbiote suite à des traitements pharmacologiques ou à des pathologies diverses), devrait voir le jour prochainement pour mieux comprendre les éventuelles relations de cause à effet et les mécanismes sous-jacents. Cela devrait, à terme, déboucher sur de nouvelles orientations thérapeutiques possiblement « multi-organes ».

Cette approche multi-organes est également très pertinente dans les maladies métaboliques telles que le syndrome métabolique, le diabète et l'obésité. En effet, ces maladies sont souvent associées à des troubles micro-vascu-

lares et des processus inflammatoires systémiques induisant une fibrose tissulaire et une défaillance fonctionnelle au niveau de plusieurs organes, à savoir le système cardio-circulatoire central, le foie et le tissu adipeux. Au cours de la progression de ces processus fibro-inflammatoires, il existe des interactions hémodynamiques et métaboliques étroites entre ces organes. Pour cibler ces interactions de manière efficace, une quantification fine et précise des processus fibro-inflammatoires systémiques doit reposer sur une approche multi-organes et multi-paramétriques (imagerie et autres données omiques). Ainsi, il est crucial de mettre au point de nouveaux biomarqueurs non invasifs pour détecter et caractériser ces processus à leur stade précoce et éventuellement réversible.

II. Avancées technologiques : ingénierie pour la santé, imagerie biomédicale

A. Organes-sur-puces (OOAC)

Les OOAC (organs-on-a-chip), ou systèmes microphysiologiques (MPS), sont des systèmes miniaturisés dynamiques qui reproduisent les fonctions structurale, micro-environnementale et physiologique d'organes humains. Ils sont issus de la convergence entre microfabrication et ingénierie tissulaire. Les applications visées sont notamment la mise au point de médicaments, la pharmacocinétique, la biodistribution, la toxicité systémique ou l'étude de pathologies dans un contexte de médecine de précision.

Les OOAC sont constitués de modèles cellulaires (cellules individuelles, tissus ou plusieurs modèles cellulaires interconnectés) positionnés dans un dispositif microfluidique et disposés dans un environnement représen-

tant au mieux les conditions (physiologiques ou pathologiques) dans lesquelles les organes fonctionnent *in vivo*. Ces systèmes sont des alternatives aux méthodes conventionnelles de culture cellulaire en 2D en permettant la structuration en 3D, l'inclusion d'environnements physiques (variations de rigidité, de rugosité, de flux...) et biochimiques (composition, dégradabilité...) et la communication entre cellules ou tissus. Pour que les OOAC deviennent un outil physiologiquement pertinent pour le bénéfice du patient, l'ensemble des constituants (matériaux, cellules, gestion des fluides et suivi de la viabilité en temps réel) devra être mis au point, testé, optimisé et validé.

Les OOAC devraient représenter une réelle plus-value dans les études de toxicité ciblée (foie, cœur, système nerveux), dans la reproduction des systèmes barrières (intégrité, étanchéité, transport) et dans la combinaison de plusieurs organes, en essayant de mimer un organisme de plus en plus complet («body-on-a-chip», BOAC). Ainsi les OOAC comportant des combinaisons foie / rein, foie / intestin, foie / moelle osseuse, l'intégration d'un système vasculaire ou immunitaire constitueront, en cas de succès, les outils d'essais *in vitro* physiologiquement pertinents de demain.

L'utilisation des OOAC dans l'industrie médicale et pharmaceutique dépendra de la réussite de la validation des dispositifs afin de garantir que les fonctions biologiques reproduites sur la puce sont représentatives des tissus. Pour mieux répondre aux besoins et aux normes de l'industrie pharmaceutique, de nombreux systèmes d'OOAC sont en cours de développement en collaboration avec des laboratoires académiques et l'industrie pour prendre en compte dès les premières phases de développement les contraintes liées à la commercialisation et à la validation réglementaire des OOAC. Le succès d'un OOAC dépendra non seulement de sa validité scientifique mais également de la facilité et de l'évolutivité de son procédé de fabrication qui, s'ils ne sont pas implémentés, pourraient constituer un écueil considérable dans le processus de commercialisation. Il faudra par conséquent trou-

ver un compromis entre complexité du dispositif et facilité et robustesse de fabrication. L'impression 3D pourrait être utilisée pour automatiser et développer la production d'OOAC permettant ainsi un gain en rendement (prototypage rapide), en reproductibilité (automatisation) et en coût de fabrication. L'évolution vers la bio-impression, c'est-à-dire l'impression directe d'un tissu cellulaire d'intérêt, est en plein essor et promet des productions robustes. L'avenir dira si cela est réalisable à grande échelle et éthiquement acceptable.

Bien que cette technologie soit très prometteuse, l'utilisation des organes sur puces dans les programmes de recherche précliniques ou cliniques est actuellement un domaine à la fois enthousiasmant et incertain. Comme dans le cas de toute nouvelle technologie, il sera nécessaire d'éprouver et de générer des données convaincantes pour gagner en pertinence et amener les OOAC à un degré de maturité tel qu'ils seront acceptés par les autorités de réglementation comme complément ou substitut des modèles animaux.

B. Ingénierie tissulaire / biomatériaux

Il existe deux grandes approches d'ingénierie pour la régénération tissulaire. La première, proche de la médecine «substitutive», consiste à développer des biomatériaux destinés à mimer les propriétés architecturales, mécaniques et, idéalement, biologiques des tissus sains. Cette stratégie vise à élaborer des constructions tridimensionnelles avec des propriétés de résistance mécanique se rapprochant de celles des tissus natifs, en combinant l'utilisation de polymères adaptés et des techniques avancées de fabrication. Les nouvelles techniques de fabrication additive ont investi le monde médical et l'impression 3D de matière (par moulage, bio-impression additive ou «puzzling»), associée à des approches d'imagerie 3D, permet la fabrication d'implants de sub-

stitution de géométrie complexe, personnalisables avec une architecture interne contrôlée.

Une des difficultés majeures des biomatériaux reste leur compatibilité avec les systèmes biologiques qui peut être améliorée de 2 façons différentes : i) l'utilisation de polymères naturels qui possèdent une bonne biocompatibilité et biodégradabilité, une faible immunogénicité et intègrent des motifs structuraux vecteurs d'activités biologiques, comme l'interaction avec la matrice extracellulaire ou les cellules du micro-environnement ; ii) l'intégration de cellules avant implantation, domaine de la bio-impression 3D, qui vise à fabriquer des tissus biologiques vivants selon des motifs et des formes 3D préalablement définis.

Les polymères naturels sont généralement composés de polysaccharides variablement sulfatés ou de gélifiants combinés à des protéines, seules ou en association. Leurs propriétés mécaniques en conditions physiologiques peuvent être améliorées par la réticulation physique de dérivés modifiés porteurs de groupements fonctionnels alkyl, ioniques ou photopolymérisables, voire par leur association avec des polymères synthétiques dans des hydrogels composites. Des nanomatériaux inorganiques, comme l'hydroxyapatite, peuvent être incorporés quand une contrainte mécanique maximale est physiologique comme, par exemple, pour le tissu osseux. Les capacités modestes d'interaction ou d'adhésion cellulaire des polysaccharides peuvent être améliorées par fixation chimique ou nanostructuration de séquences de liaison aux intégrines ou par mélange avec des dérivés collagéniques qui expriment naturellement des domaines d'adhésion cellulaire. Certains d'entre eux permettent également une versatilité de leur polymérisation, comme par exemple une gélification thermocontrôlée à partir de solutions aqueuses, ce qui améliore leur injectabilité notamment pour permettre une administration intracérébrale.

La bio-impression 3D a reçu un fort engouement, non seulement pour le développement de modèles d'organes et tissus *in vitro* (organoïdes complexes ou étude d'interactions entre tissus), mais également pour la fabrica-

tion de produits d'ingénierie tissulaire bio-imprimés. Si des tissus d'organisation anatomique relativement simple, comme la peau, ont pu être produits, la fabrication d'organes complexes (rein/os/cœur...) reste un challenge considérable.

Les principaux défis dans ce domaine de recherche sont de : i) découvrir ou élaborer des nouveaux polymères synthétiques biocompatibles et/ou de nouvelles combinaisons avec des polymères naturels ; ii) améliorer ou mettre au point des nouveaux procédés de fabrication des supports qui miment au plus près la complexité structurale des tissus à remplacer. Les principaux verrous technologiques sont la sélection appropriée d'encres bio-imprimables, le choix du type cellulaire et des facteurs de croissance, trophiques et de différenciation, ainsi que le procédé de fabrication qui sera le plus compatible avec le contrôle de la différenciation et la survie cellulaires. Ces procédés de fabrication devront être rapides à mettre en œuvre, permettre de contrôler le positionnement spatiotemporel des cellules dans les biomatériaux et de préserver l'intégrité cellulaire après implantation en procurant un environnement protecteur et des propriétés biomécaniques adaptées ; iii) améliorer la résolution de la bio-impression pour l'amener à la fabrication des matériaux biomimétiques avec une structuration contrôlée aux échelles micro/nanométriques ; iv) concevoir des biomatériaux supports dont la dégradation sera synchrone avec la néo-synthèse tissulaire, afin d'améliorer leur innocuité à long terme ; v) comprendre le rôle du système immunitaire dans la régénération tissulaire avec pour objectif de modifier la surface des matrices implantées (fonctionnalisation de surface), pour contrôler les réponses immuno-inflammatoires post-implantation et/ou promouvoir localement la régénération tissulaire. Cette démarche peut d'ailleurs être étendue à l'utilisation de biomatériaux à des fins vaccinales puisque, par exemple, leur fonctionnalisation de surface par des ligands de récepteurs exprimés à la surface des cellules immunitaires (notamment les cellules présentatrices d'antigènes) pourrait permettre l'élaboration de nanoplateformes utilisables par voie non injectable. Pour des

applications cliniques, tous ces progrès technologiques devront, bien entendu, être compatibles avec les normes biomédicales en vigueur (normes « médicaments de thérapie innovante préparés ponctuellement », MTI-PP), qui sont très restrictives.

La seconde approche, plus conforme à une médecine « régénérative », consiste à favoriser les processus physiologiques de régénération tissulaire en apportant aux cellules un microenvironnement favorable. Le concept est de mettre à disposition des cellules résidentes, une matrice extracellulaire « artificielle » qui favorise leur croissance, prolifération et différenciation dans les sites à réparer. Contrairement à l'approche biomimétique, le matériau ne nécessite pas d'avoir des propriétés biomécaniques proches de celles du tissu à réparer puisqu'il n'a vocation qu'à créer transitoirement un micro-environnement tridimensionnel favorable. La stratégie consiste généralement à vectoriser au site lésionnel, par injection locale ou par « patch », des cellules différenciées, progénitrices ou souches mésenchymateuses encapsulées dans des hydrogels en présence des facteurs de croissance nécessaires à l'acquisition ou au maintien de leur phénotype différencié. Les potentialités des cellules souches pluripotentes induites dans cette stratégie nécessitent d'être confirmées en raison du risque potentiel de carcinogénèse. Les facteurs de croissance ou autres acteurs (miRs, antagomiRs...) peuvent être libérés de façon prolongée (ou non) à partir de microsphères, après mélange ou fixation covalente sur les polymères de la matrice artificielle ou, plus rarement, par transfert de gènes ou sous forme de vésicules extracellulaires produites par des cellules génétiquement modifiées. Dans ce domaine de recherche, les principaux défis sont de maîtriser : i) la libération contrôlée sous forme biologiquement active, au site de réparation, des facteurs de croissance/trophiques adéquats ou des régulateurs moléculaires, comme les micro-ARNs (miRs), pour reproduire le plus fidèlement possible la séquence de différenciation cellulaire ou de maintien du phénotype cellulaire différencié. Les thérapies basées sur la libération de miRs ou d'antagomiRs ont donné des succès encourageants lors-

qu'ils sont libérés à partir de cellules transfectées ou transduites insérées dans une matrice avant implantation. Le défi à venir est leur libération à partir de la matrice pour pouvoir contrôler la différenciation des cellules implantées, voire des cellules réparatrices autochtones ; ii) le pré-conditionnement des cellules progénitrices pour qu'elles adaptent leur métabolisme aux conditions micro-environnementales moins favorables (troubles hormonaux ou métaboliques, inflammation, etc.) auxquelles elles seront exposées après implantation chez des patients avec des comorbidités ; iii) la vascularisation du greffon puisque la faible viabilité des cellules dans un environnement ischémique post-implantation reste un défi majeur à relever en ingénierie tissulaire ; iv) la sélection des facteurs de croissance nécessaires à la différenciation tissulaire et leur synchronisation de libération (pré-conditionnement) par rapport au processus de différenciation ; v) l'adéquation entre la mise en œuvre de systèmes dynamiques de culture cellulaire comme les bioréacteurs et les technologies avancées de fabrication pour reproduire la fonctionnalité d'organes d'épuration (foie, rein) ou l'organisation zonale stratifiée de certains tissus (cartilage, peau, vessie par exemple). Cet objectif peut également être atteint en développant des systèmes multicouches possédant des propriétés fonctionnelles différentes, à l'instar des épithéliums/endothéliums de l'organisme. Quelle que soit la méthodologie mise en œuvre, le transfert clinique pour la médecine de précision nécessite encore beaucoup de développements technologiques et la démonstration que sa balance efficacité / innocuité est favorable. En revanche, les domaines de l'ingénierie tissulaire et des organes sur puces s'auto-fertilisent.

C. Interface homme / machine pour le diagnostic et la pharmacologie

Il s'agit ici de la conception et de la mise en œuvre de systèmes implantables destinés à

mesurer des paramètres biologiques *in vivo*, afin d'établir un diagnostic. Dans les versions les plus élaborées, ces systèmes de diagnostic peuvent en retour guider une action thérapeutique, soit par stimulation électrique soit par le relargage *in situ* de substances pharmacologiques. Un exemple est le développement d'électrodes implantables dans le cerveau afin de collecter des informations sur l'excitabilité neuronale puis de la contrôler, notamment dans la prévention de la crise épileptique. Le challenge majeur dans le domaine des interfaces homme-machine concerne la tolérance de l'organisme à ces dispositifs. Pour les rendre moins invasifs, il s'agit de les miniaturiser et de les rendre biocompatibles en optimisant leurs propriétés structurales et leur chimie de surface. La technologie sans fil, dans laquelle l'objet implanté communique les paramètres mesurés au travers d'ondes, s'avère une approche prometteuse pour des systèmes plus autonomes et mieux tolérés. Le développement de ces interfaces homme-machine requiert une approche inter-disciplinaire impliquant électroniciens, chimistes et biologistes.

Il est aussi à noter le développement de dispositifs bio-électroniques hybrides implantables ou absorbables, basés sur l'interfaçage de composants électroniques et de microorganismes « synthétiques » vivants conçus par ingénierie génétique pour rapporter de manière non invasive des désordres physiologiques ou/et délivrer des solutions thérapeutiques ciblées.

D. Imagerie biomédicale

Les recherches et évolutions technologiques en imagerie bio-médicale ont permis de grandes avancées offrant aujourd'hui des outils d'exploration *in vivo* et non invasifs incontournables en recherche préclinique et clinique. Les développements se poursuivent pour améliorer la résolution spatiale ou temporelle, ainsi que pour faire émerger de nouveaux contrastes, de nouvelles techniques d'encodage et des biomarqueurs d'une grande sensibilité. Grâce à

ces avancées technologiques, les modalités d'imagerie, par leur complémentarité, sont capables désormais d'explorer finement la morphologie, la fonction, le métabolisme et l'écoulement sanguin dans les modèles animaux et chez l'homme. Elles sont ainsi utilisées en toute complémentarité afin de détecter et de caractériser les pathologies toujours plus précocement, mieux guider le diagnostic, la planification chirurgicale et le suivi thérapeutique.

Outre les méthodes classiques d'imagerie ultrasonore, des méthodes telles que l'élastographie ou les ultrasons localisés de haute intensité pour la thérapie ciblée commencent à s'imposer dans la pratique clinique. De plus, l'imagerie ultrasonore ultrarapide associée aux techniques de super-résolution permet à présent la localisation hautement résolue en profondeur, notamment du réseau vasculaire avec l'adjonction de microbulles. Ces développements évoluent actuellement vers l'imagerie préclinique et clinique notamment pour la détection d'accidents vasculaires cérébraux à l'aide d'un système portatif disponible sur le terrain. Le principal défi des années à venir concerne la mise au point des stratégies permettant de s'affranchir de l'atténuation liée à la boîte crânienne. Certains développements actuels portent sur la théranostique et la chimie *in situ* avec l'utilisation des nanobulles qui offrent un contraste supérieur et sont aussi utilisées comme activateur de la sonoporation. Les principales applications sont la vectorisation pour l'activation de médicaments et particulièrement les chimiothérapies pour lesquelles un franchissement de la barrière hémato-encéphalique est nécessaire. Un domaine émergent est l'obtention d'une information de type "spectroscopie ultrasonore" à l'aide d'excitation haute fréquence et l'extraction du signal rétro-diffusé qui offre une signature cellulaire des cellules cancéreuses par exemple.

De nouvelles perspectives émergent en imagerie aux rayons X pour l'imagerie des tissus mous et l'imagerie fonctionnelle ainsi que pour la réduction des taux d'irradiation et des doses de produits de contraste injectés. La tomographie spectrale à comptage de photons

ou SP-CT et notamment la technique K-edge avec des agents de contraste utilisés comme biomarqueurs ou radio traceurs permettent à présent d'avoir accès à une imagerie fonctionnelle. La tomographie X par contraste de phase ouvre la voie à l'imagerie des tissus mous ou des interfaces avec une faisabilité démontrée pour l'imagerie préclinique. Des développements en termes d'instruments et de traitements de données sont nécessaires pour mener cette technique au niveau clinique. L'investigation de la micro-architecture osseuse a motivé le développement d'appareils de CT à rayons X à très haute résolution. Ces techniques sont devenues incontournables en recherche préclinique, en particulier en ingénierie tissulaire osseuse, mais ont des applications dans tous les domaines. De plus, leur développement jusqu'à des échelles nanométriques permettra de réaliser de nouvelles microscopies X 3D plein champ et non destructives.

En IRM (imagerie par résonance magnétique) l'amélioration des séquences, des antennes et des méthodologies de reconstruction des images ainsi que la montée en champ magnétique permettent de gagner toujours plus en résolutions spatiale et temporelle tout en atteignant des qualités de signal et de contraste sans précédent. Dans le domaine des ultra-hauts champs, la France est équipée de 3 imageurs à 7 Tesla et s'est dotée récemment du premier IRM à 11,7 Tesla au niveau mondial (projet YSEULT, Neurospin). L'IRM ultra-haut champ constitue un champ de développements à part entière pour le transfert vers la clinique. Un intérêt existe également pour le développement des champs faibles pour des systèmes moins complexes et coûteux et un accès plus généralisé avec des développements associés pour accroître la sensibilité. Les innovations dans la technologie des antennes de radiofréquence où la France a une bonne expertise couvrent notamment les cryosondes, les métamatériaux et les antennes en réseaux phasés, à la transmission ou la réception avec des spécificités pour les bas ou hauts champs. De nouvelles méthodes en IRM et spectroscopie de résonance magnétique sont développées pour une vision dynamique des atteintes pathologiques.

En parallèle au développement spectaculaire de l'imagerie optique pour l'imagerie cellulaire, des méthodes optiques couvertes par la section 28 sont spécifiques au domaine de la santé avec le développement de nouveaux outils diagnostiques et d'exploration notamment pour l'endoscopie digestive ou l'imagerie haute résolution de la rétine.

En imagerie TEP (tomographie par émission de positons) l'enjeu reste la sélectivité moléculaire. L'un des défis à l'heure actuelle est par exemple de trouver des marqueurs moléculaires TEP spécifiques et sélectifs des différentes formes d'agrégats (tau, Abeta, alpha-synucléine...) pour les maladies neuro-dégénératives pour réaliser un diagnostic différentiel et suivre des molécules thérapeutiques dont l'effet passe certainement par une diminution de l'agrégation. De nouvelles méthodes en TEP se développent pour une vision dynamique des atteintes cérébrales.

Les enjeux sont également de multiplier les informations issues de ces différentes techniques d'imagerie afin de couvrir les aspects morphologiques, fonctionnels, métaboliques et hémodynamiques de l'organe exploré ou de combiner les techniques avec le développement des imageurs hybrides tels que le TEP-IRM ou l'association TEP-ultrasons dont plusieurs équipements ou prototypes existent en France. La capacité à extraire des biomarqueurs synthétiques et sensibles des informations générées par ces imageries multimodales permettra un phénotypage riche des phénomènes physiopathologiques complexes et un diagnostic précoce et personnalisé pour le patient. Plusieurs cathéters hybrides ont été introduits en cardiologie, combinant notamment la spectroscopie proche infrarouge et l'échographie intravasculaire (NIRS-IVUS) ou plus récemment l'auto-fluorescence proche infrarouge et la tomographie en cohérence optique (NIRAF-OCT). En raison du caractère multifactoriel des lésions athéromateuses, l'un des objectifs est de fournir un seul dispositif endoscopique tri-modal qui caractérise complètement les lésions coronaires.

L'imagerie pour le guidage de thérapies ou l'imagerie interventionnelle qui est moins invasive pour le patient et moins coûteuse est en

plein essor et la France y occupe une place de tout premier plan au niveau international. Parmi les techniques de guidage, les techniques non-ionisantes telles que l'IRM et les ultrasons occupent une place de choix mais nécessitent le développement de méthodes d'imagerie temps réel où la problématique du mouvement des organes doit être prise en compte.

Les progrès dans les méthodes computationnelles, en particulier en intelligence artificielle, révolutionnent le traitement d'images mais aussi l'acquisition et la reconstruction d'images, là aussi dans les différentes modalités d'imagerie. L'exploitation des méthodes d'apprentissage profond en reconstruction suscite de nombreuses perspectives, que ce soit pour la réduction de dose, en scanner X classique ou pour la formation de l'image dans les modalités émergentes d'imagerie tomographique (spectrale, phase, microscopie...) ou en IRM combinées aux techniques de sous échantillonnage avec des gains de temps considérables à l'acquisition et la reconstruction.

Le concept de radiomique a émergé avec l'extraction de données quantitatives complexes et multi-échelles à partir des images dans le but ultime de les combiner avec d'autres données « omiques » pour converger vers une médecine de précision. En effet, les biomarqueurs d'imagerie occupent une place importante dans le contexte de la médecine actuelle de précision dans les grands domaines de pathologies couvrant notamment l'oncologie, la neurodégénérescence et les maladies cardiovasculaires et métaboliques.

Les recherches en imagerie sont très bien développées en France et sont représentées par une communauté forte. Elles reposent sur des instruments souvent coûteux en termes de prix d'achat et de maintenance. La communauté a été organisée et dotée significativement en équipements dans le cadre des investissements d'avenir dont l'infrastructure "France Life Imaging", les instituts hospitalo-universitaire "IHU", Equipex et Labex, mais la suite de ces programmes se pose pour la pérennité des plateformes mises en place.

E. Agents pour l'imagerie / théranostiques

Au-delà des simples caractéristiques structurales, le fait de pouvoir visualiser des processus biologiques, pertinents sur le plan clinique, permettrait de diagnostiquer de façon plus sûre une pathologie et de mieux appréhender son évolution. C'est exactement ce que les technologies d'imagerie moléculaire peuvent proposer en suivant l'accumulation de traceurs moléculaires, spécifiques de biomarqueurs, sur les sites où l'activité de la maladie est accrue. La richesse des biomarqueurs mis en exergue par la communauté scientifique ces dernières années a suscité un réel engouement pour ce type d'imagerie, à des fins purement diagnostiques ou dans l'espoir de concevoir un outil théranostique efficace.

Les applications en imagerie optique chez l'homme nécessitent le développement de sondes de fluorescence proche infrarouge (NIRF) et de cathéters, en raison d'une profondeur de pénétration de la fluorescence inférieure à 200 μm . Parce qu'elles présentent moins de risques que les méthodes d'imagerie endoscopiques et ne nécessitent pas l'hospitalisation des patients, les méthodes d'imagerie moléculaire non invasives ouvrent une évaluation systématique des risques dans des groupes de patients plus importants. La tomographie à émission de positrons (TEP) à l'aide de nanoparticules fonctionnalisées ou d'anticorps marqués à des radionucléides non conventionnels, tels que ^{64}Cu , ^{68}Ga , ^{86}Y , ^{89}Zr dont les demi-vies plus longues autorisent une clairance du signal sanguin et une imagerie plus tardive, suscite aujourd'hui un regain d'intérêt. Par ailleurs, l'échographie, la tomodensitométrie (TDM) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM), réputées pour être des techniques de diagnostic peu sensibles, ont été réinvesties en modalités de ciblage moléculaire. Un grand nombre de nanoparticules ciblées ont été conçues pour cartographier des biomarqueurs appropriés, connus pour être surexprimés dans les pathologies associées. Divers nanomatériaux dotés de propriétés physico-chimiques ajustables et

permettant une durée de vie acceptable et une élimination par les voies biologiques naturelles ont été explorés. La fonctionnalisation de nanoparticules, micelles, liposomes ou nanoémulsions est une étape critique pour un ciblage efficace. Dans les études les plus récentes, les fragments d'anticorps humanisés ou humains ou encore les anticorps de camélidés représentent une classe de ligands privilégiée, de taille relativement petite, non immunogène, présentant de fait des possibilités facilitées de transfert vers la clinique.

En cancérologie plus particulièrement, le concept de sondes théranostiques, associant thérapie et diagnostic, introduit il y a quelques années, suscite toujours un vif intérêt. Leur développement est basé sur la valorisation des médicaments et agents hautement spécifiques, l'exploitation et l'association de radioisotopes innovants (^{177}Lu , ^{210}At , $^{64/67}\text{Cu}$) et de couples de radioisotopes appropriés. Les développements impliquent également l'élaboration de plateformes chimiques « multi-usage » et multifonctionnelles incluant les nano-objets, les nanomatériaux et les « biologics », la mise au point de techniques de radiomarquage basées sur la chimie bio-orthogonale, les techniques de précipitation et, dans le cas spécifique de matériaux particuliers (comme ceux à base de carbone), la recherche de méthodes de vectorisation ou de fonctionnalisation jouant sur la pharmacocinétique dans le but de minimiser les risques toxiques *in vivo*. Ces outils chimiques sont aussi largement recherchés pour le développement d'agents d'imagerie multimodaux permettant de tirer parti de chacun des avantages et spécificités des différentes modalités (sensibilité, résolution) et d'accéder à une imagerie multi-échelle, de la cellule au système intégré.

Conclusion

Les avancées dans les domaines de la pharmacologie, la bio-ingénierie et des technologies pour la santé enrichissent les connais-

sances et génèrent aussi un fort potentiel de valorisation socio-économique en contribuant à répondre à des enjeux majeurs de santé publique. Ces recherches conduisent *in fine* vers l'amélioration de l'efficacité des traitements, le suivi des patients et ouvrent la voie à l'application de traitements personnalisés grâce à la prise en compte des variabilités individuelles de l'expression des pathologies. Identifier le biomarqueur qui permettra de comprendre et de suivre le plus précocement possible et avec précision l'évolution de la maladie, ou bien sa réponse à un traitement, est un enjeu majeur pour la médecine actuelle. Ces avancées sont sources de développement économique pour l'industrie pharmaceutique et les entreprises spécialisées dans les technologies pour la santé. De nombreuses « startups » émergent dans ce domaine. Cependant la rentabilité économique et la complexité des processus conduisant à la commercialisation de nouveaux médicaments ou dispositifs médicaux peuvent freiner la valorisation de ces développements innovants. La collaboration entre la recherche académique et le milieu industriel est un facteur de développement dans ce domaine.

Parmi les pathologies abordées par les unités de recherche sur les versants pharmacologique, thérapeutique ou diagnostique, le cancer occupe une place importante suivi par les maladies neurodégénératives et infectieuses. Les recherches sur les pathologies cardiovasculaires et métaboliques sont par contre moins développées dans les laboratoires du CNRS, cette thématique étant plus présente dans les unités de recherche dépendant de l'INSERM.

Au cours des dernières années des chercheurs ont été recrutés dans les différents axes de recherche analysés dans ce document. Multidisciplinaire et aux interfaces de différents domaines de recherche fondamentale ou technologique, la section 28 se caractérise par des développements *in fine* pour la santé. Elle développe en effet des recherches proches de la thérapeutique et du diagnostic qui la distinguent des autres sections et CIDs, bien que l'on puisse retrouver une base fondamentale en

biologie, chimie ou physique traitée par d'autres sections. Certains axes de recherche présentent des synergies avec d'autres établissements, notamment l'INSERM et le CEA, donnant lieu à des laboratoires à plusieurs tutelles dans lesquelles les différents opérateurs sont complémentaires.

Ces domaines de recherche sont en constante évolution avec l'accélération des innovations technologiques et à présent le développement de l'intelligence artificielle que les chercheurs doivent s'approprier.

SECTION 29

BIODIVERSITÉ, ÉVOLUTION ET ADAPTATIONS BIOLOGIQUES : DES MACROMOLÉCULES AUX COMMUNAUTÉS

Composition de la section

Fabrice VAVRE (président), Olga OTERO (secrétaire scientifique), Anne-Geneviève BAGNÈRES-URBANY, Vincent BELS, Amandine BLIN, Christophe BONENFANT, François BRISCHOUX, Marie CHARPENTIER, Jean-Philippe DAVID, Christophe DOUADY, Xavier DUCHEMIN, Jonathan FILÉE, Sébastien GIBERT, Mohamed JEBBAR, Hélène MORLON, Thierry PÉREZ, Ana RIVERO, Tony ROBILLARD, Irène TILL-BOTTRAUD, Xavier VEKEMANS, Mylène WEILL

Introduction

L'écriture de ce rapport a été l'occasion de nous pencher sur la science menée au sein de la section, comme attendu, mais aussi sur les questions connexes qui se sont imposées à nous durant cette mandature. Il s'agit d'une part de l'évolution du concours, des critères utilisés et de la question de la parité, lors du concours et dans l'avancement des carrières. D'autre part, devant les difficultés pour financer leurs travaux et le mal-être induit dont les chercheurs.euse.s font état de façon croissante dans les rapports d'évaluation, nous avons mené une enquête sur le financement sur projet et son impact, auprès des CR et DR de la section. La place dédiée à la

science et aux thématiques émergentes en a été d'autant réduite, mais la situation de la recherche et les perspectives actuelles appellent que l'on s'arrête sur les conditions dégradées de son exercice au moins autant que sur son exercice lui-même.

Les champs de recherche actuellement couverts par la section 29 sont centrés sur quatre thématiques majeures :

(i) Biodiversité (origine et dynamique spatio-temporelle à différents niveaux d'organisation et d'échelles de temps, notamment en lien avec les changements globaux),

(ii) Evolution (micro- et macroévolution, spéciation, mécanismes, dynamique, modélisation),

(iii) Adaptation (facteurs sélectifs, mécanismes, dynamique, impact),

(iv) Ecologie (interactions intra- et interspécifiques, écologie des communautés, dynamique des écosystèmes et populations, écologie de la santé, écologie comportementale).

Ces thématiques générales couvrent un large panel de disciplines et de méthodes : écologie expérimentale et de terrain, écologie évolutive, biologie, génétique et génomique des populations ; génomique environnementale et métagénomique, paléontologie, paléogénétique et paléogénomique, écophysiologie, épigénétique et omiques (transcriptomique, protéomique, métabolomique), bioinformatique, phylogénomique, modélisation (théorique, explicative et prédictive). Les travaux embrassent toute la biosphère, des plus hauts sommets continentaux aux grands fonds océaniques, et ce à toutes les échelles de temps et d'espace. La diversité des approches est au service d'objectifs communs : décrire la diversité biologique à différents niveaux d'organisation, du gène à l'organisme, à la population jusqu'à la communauté afin de comprendre les processus qui la façonnent. Si les recherches fondamentales menées au sein de la section en constituent le socle, elles résonnent également en termes d'application. La période actuelle, marquée par de profondes modifications environnementales et des pressions toujours plus grandes sur la biodiversité, oblige à renforcer encore ces recherches, afin d'affiner la compréhension de ces processus pour prédire le devenir de la biodiversité et finalement agir en conséquence.

Bilan des unités

34 unités sont rattachées principalement à la section 29, ainsi que 4 FR, 11 GDR et 5 UMS. Parmi les unités, la majorité sont des UMR (28). On compte également 2 UMI (Chili, Afrique du Sud), 2 USR et 2 FRE. 22 unités sont rattachées

secondairement à au moins un autre institut du CNRS (6 instituts sont concernés), en particulier et de manière tout à fait logique étant donné les domaines de recherche de la section, avec l'INSB (15 unités). Outre les partenariats universitaires, les établissements partenaires sont notamment le MNHN, l'IRD, l'INRAE, le CIRAD, l'IFREMER, L'EPHE et de manière plus ponctuelle l'Institut Pasteur et l'INSERM. Les unités couvrent le territoire métropolitain, avec notamment une forte présence en région Île-de-France (8, représentant environ 20 % des effectifs chercheur.euse.s) et en Occitanie (7, représentant environ 40 % des effectifs chercheur.euse.s). Étant donné les enjeux de biodiversité et de santé globale dans les zones ultramarines, plusieurs unités y sont présentes (Guyane, Réunion, Nouvelle Calédonie, Polynésie Française).

Analyse rétrospective du concours CR

Nombre de postes et de candidatures

Dans un contexte de forte réduction du nombre de postes au concours CR, mais également d'une discussion des critères d'évaluation dans le cadre de la science ouverte, il nous a semblé judicieux d'analyser rétrospectivement l'évolution des profils des candidat.e.s et des personnes recrutées pour objectiver certains éléments de l'évaluation, notamment ce qui concerne l'âge au recrutement et les données bibliométriques.

Durant la dernière décennie, le nombre de postes ouverts annuellement aux concours CR en section 29 a baissé régulièrement passant de 10-11 postes au début des années 2010 à 5 postes en 2019 (Fig. 1).

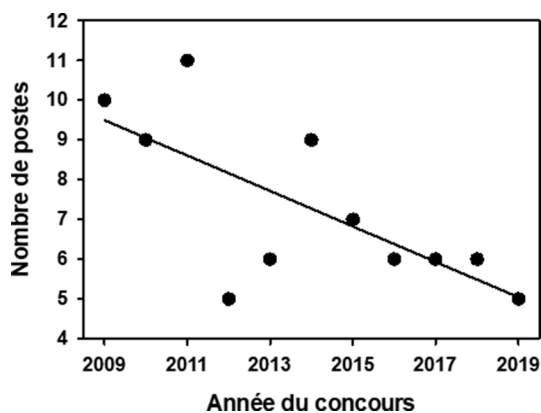


Figure 1 : Nombre de postes CR au concours depuis 2009.

Parallèlement, le nombre de candidatures semble également diminuer au cours du temps (175 en 2011, 118 en 2018), mais cette tendance n'est pas significative et est accentuée par les candidatures multiples CR2 et CR1 avant la fusion des deux grades en 2018. Sur cette période, la proportion de candidats étrangers est restée relativement constante au cours du temps (~25%), traduisant un maintien de l'attractivité du métier de chercheuse.s au CNRS à l'international au cours du temps. De manière intéressante, le nombre de candidatures étrangères est positivement lié au nombre de candidatures totales.

Expérience de recherche

L'analyse des profils de l'ensemble des candidat.e.s depuis 2013 montre que l'expérience de recherche moyenne des candidat.e.s a augmenté, passant d'une moyenne de ~ 5 ans en 2013 à ~ 6 ans en 2019 (mais voir la très grande variation de cet indicateur). En fonction du stade du concours, cette augmentation reste détectable uniquement pour les candidat.e.s classé.e.s sur liste principale, pour lequel.le.s l'expérience de recherche passe d'une moyenne de ~ 5 ans en 2013, à ~ 8 ans en 2019. Pourtant, l'expérience de recherche n'influence pas le fait de rester dans le concours aux autres étapes de celui-ci. Étant donné la

grande variabilité dans les profils retenus et les faibles effectifs sur lesquels elle est calculée, cette tendance doit être analysée avec prudence. Différents facteurs pourraient l'expliquer, comme la meilleure prise en compte des arrêts au cours de la carrière, mais aussi, et de manière plus inquiétante, la réduction du nombre de postes. Avec seulement deux années depuis la fusion des grades CR1 et CR2 au profit d'un grade unique (CRCN), il est encore difficile de mesurer l'impact de cette mesure sur l'expérience au recrutement.

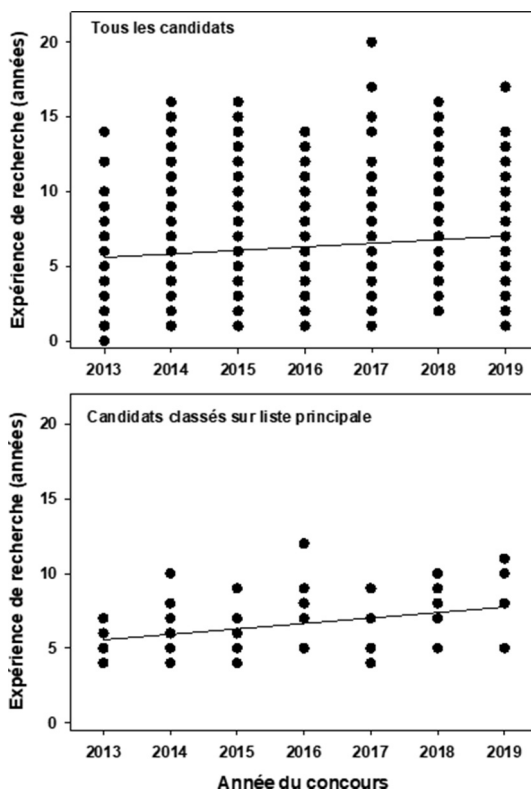


Figure 2 : Expérience de recherche de l'ensemble des candidat.e.s (en haut) et des candidat.e.s classé.e.s (en bas) en fonction de l'année du concours.

Dossier de publications

Durant cette même période, une relation positive entre l'expérience de recherche (temps écoulé depuis l'année de soutenance de thèse) des candidats et le nombre de leurs publications est détectée. On note, par contre, une très grande variabilité dans le nombre de publications pour une expérience donnée, illustrant la diversité des profils des candidat.e.s, mais aussi des stratégies de publication. Cette relation reste globalement similaire entre catégories de candidat.e.s (auditionné.e.s ou non, classé.e.s ou non), sauf entre les candidat.e.s classé.e.s sur liste principale et liste complémentaire: la progression quantitative du dossier de publications tend à être plus marquée chez les candidat.e.s classé.e.s sur liste principale.

Quantitativement, le dossier de publications des candidat.e.s n'a pas évolué significativement sur la période 2013-2019 et ce, quel que soit le stade du concours considéré (figure 3). Comme pour les autres indicateurs, il existe une très grande variabilité à la fois au niveau de la totalité des candidat.e.s (de 0 à 83 articles publiés au moment du concours), mais également pour les candidat.e.s classé.e.s sur liste principale (de 11 à 45 articles publiés au moment du concours). Le nombre de publications est en général plus important chez les candidat.e.s qui sont auditionné.e.s que chez ceux.celles qui ne le sont pas. On trouve un résultat similaire pour les candidat.e.s classé.e.s sur liste principale versus ceux.celles classé.e.s sur liste complémentaire. Néanmoins, comme montré ci-dessus, il est important de souligner la large gamme de dossiers de publications chez les candidat.e.s classé.e.s sur liste principale.

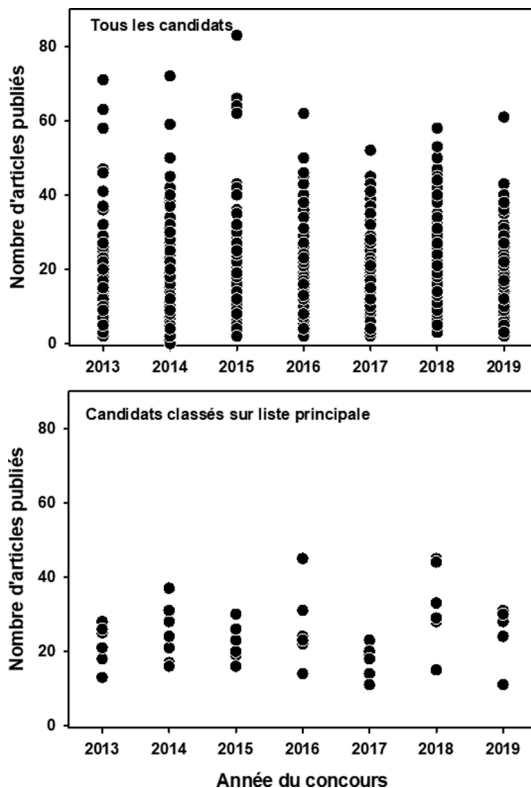


Figure 3 : Nombre d'articles de recherche publiés de l'ensemble des candidat.e.s (en haut) et des candidat.e.s classé.e.s sur liste principale (en bas) en fonction de l'année du concours.

Pour conclure, ces analyses montrent principalement qu'il n'existe pas de profil idéal pour être recruté en section 29. La très grande diversité des profils se retrouve à tous les niveaux du concours et parmi les recruté.e.s. Les aspects quantitatifs ressortent toutefois comme des éléments pouvant entrer en jeu dans certaines phases du concours sur lesquelles il conviendra de se pencher. L'augmentation de l'expérience moyenne au recrutement est une tendance forte, qui peut sans doute être rapprochée de cette même augmentation au niveau des candidatures. La baisse importante des postes mis au concours durant la dernière décennie en est certainement une des causes principales. L'analyse des conséquences de la fusion CR2/CR1 sera particulièrement importante pour les années à venir.

Parité : un bilan contrasté

Durant le recrutement

Concernant l'égalité femmes-hommes, l'analyse quantitative des candidatures reçues pour le concours CR à la section 29 montre que, sur la période 2013 à 2019, la proportion de femmes qui s'engagent dans le concours s'érode progressivement de 48 % en 2013-2014 pour se stabiliser à 30 % sur les trois dernières années (Fig. 4). À titre de comparaison, entre 2015 et 2018, la proportion de femmes qualifiées pour les postes de maître/maîtresse de conférence aux sections 67 et 68 du conseil national des universités (CNU) est de 51 % et 60 % respectivement, des valeurs que l'on peut raisonnablement considérer comme plus représentatives du « vivier » de femmes qui pourraient candidater à un poste de chercheuse au CNRS. Ces chiffres suggèrent donc une forme d'auto-censure relativement prégnante et croissante de la part des jeunes docteurs vis-à-vis du concours CNRS. Les raisons pour lesquelles les femmes candidatent moins que les hommes sont multiples, et les stéréotypes de genre semblent jouer un rôle prépondérant lorsqu'il est difficile d'évaluer ses propres performances, comme cela est le cas lors du choix de déposer une candidature ou non afin de présenter un concours, ainsi que dans le contexte d'une compétition apparente accrue par la baisse récurrente du nombre de postes. Une incitation spécifique pour les jeunes docteurs de la part du CNRS est une nécessité pour notre communauté.

Au cours du processus de sélection, les candidates et les candidats ont les mêmes probabilités de passer les différentes étapes du concours avec succès, qui est de l'ordre de 5 % du dépôt de candidature jusqu'au recrutement (Fig. 5).

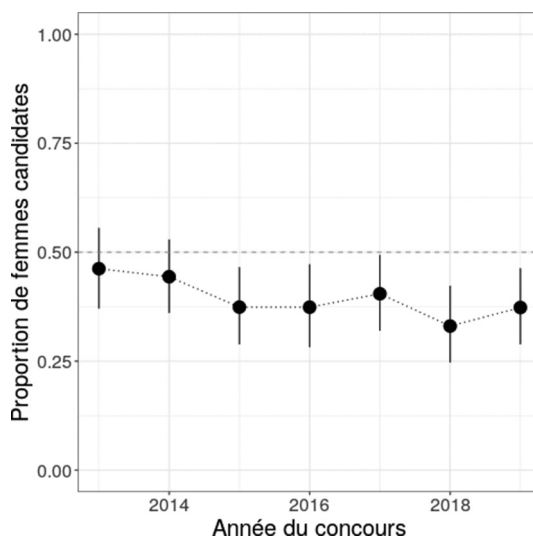


Figure 4 : Variation annuelle de la proportion de femmes qui candidatent au poste de chercheuse au CNRS au sein de la section 29 (tendance temporelle sur l'échelle logit : $\beta = -0.07 \pm 0.03$, $p = 0.04$).

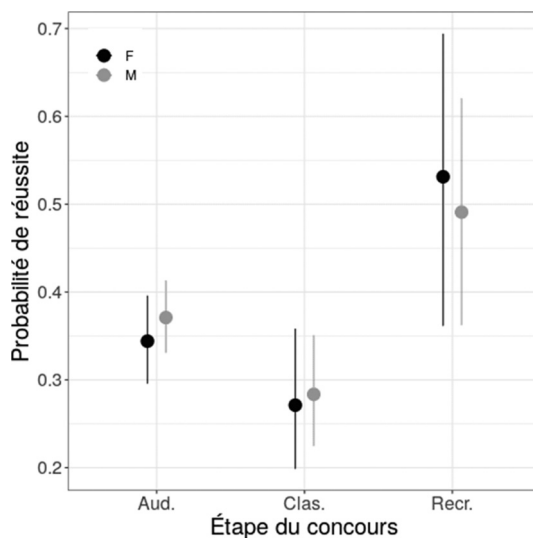


Figure 5 : Probabilité de réussite (conditionnelle à la candidature) au cours des différentes étapes du concours chercheurs / chercheuses CNRS pour les hommes et les femmes, en moyenne entre 2013 et 2019 (effet du sexe sachant celui du grade, avec une régression logistique : $\chi_2 = 1.54$, $ddl = 1$, $p = 0.21$).

Durant la carrière

L'égalité femme-homme est loin d'être atteinte en ce qui concerne la progression de carrière. La proportion de femmes diminue en effet très sensiblement entre les corps CR et DR, et entre grades au sein des DR (Figs 6,7). Si l'évolution au cours du temps est favorable avec proportionnellement davantage de femmes ces dernières années, elle s'effectue lentement (augmentation de 4% par an en moyenne). Comme pour la présentation au concours, l'auto-censure est très importante sur la période 2014-2018, la proportion de candidates étant largement inférieure au vivier pour les promotions DRCE (8% vs. 19%) et DR1 (13% vs. 31%). Cet écart est moins important pour le concours DR2 où les candidates internes représentent 28% des candidatures alors qu'elles sont 33% au sein des CR. La probabilité de promotion est équivalente pour les femmes et les hommes, excepté en DR1 où elle est supérieure chez les femmes, suggérant une fois encore, qu'une incitation forte des chercheuses pour qu'elles déposent un dossier de promotion serait le principal levier d'action permettant de briser ce plafond de verre apparent.

Pour conclure, si les processus de sélection lors du concours et des promotions semblent permettre une égalité de traitement entre les candidatures, des actions doivent être menées pour améliorer le taux de candidature des femmes et ainsi leur représentation dans les différents grades de chercheur.euse.s.

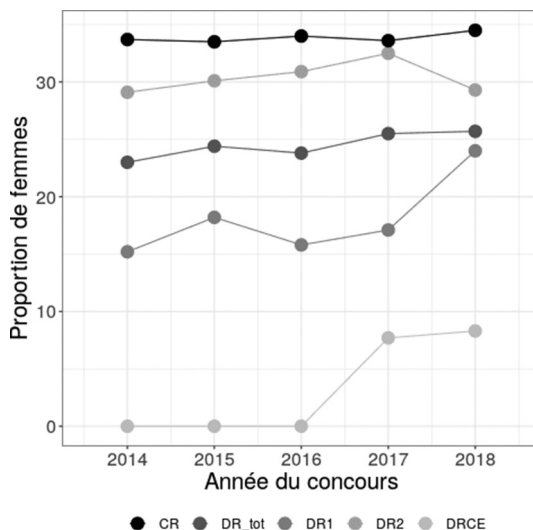


Figure 6 : variation annuelle de la proportion de femmes dans les différents grades de chercheurs / chercheuses au CNRS au sein de la section 29 (tendance temporelle sur l'échelle logit : $\beta = 0.30 \pm 0.14$, $p = 0.05$).

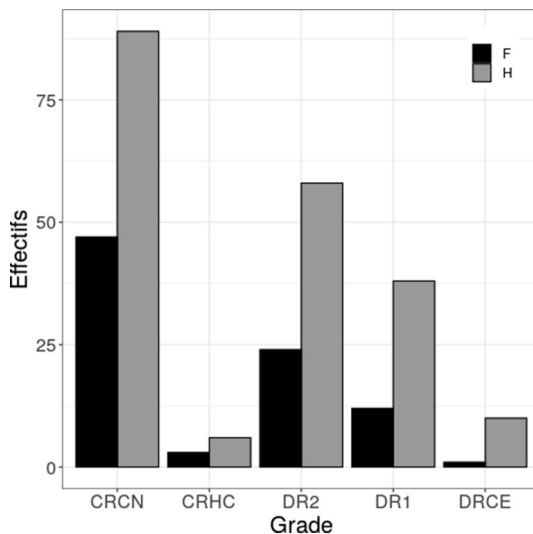


Figure 7 : Effectifs des différents grades en fonction du sexe (interaction entre sexe et grade avec une un modèle de Poisson : $\chi_2 = 5.10$, ddl = 4, $p = 0.28$).

Financement de la recherche

Un questionnaire anonyme sur le financement 2013-2017 des recherches a été proposé en décembre 2017 aux chercheur.euse.s de la section. Il portait sur les financements de types ANR, ERC et « autres », puis posait des questions sur le niveau général de satisfaction du système de financement actuel. Nous donnons ici les principaux points qui en ressortent. Le questionnaire a été rempli par 68 % des chercheur.euse.s affilié.e.s à la Section 29, avec une répartition femme/homme et une distribution par grade proche de la composition de la section.

Financements ANR:

- 86,5 % des répondant.e.s ont déposé au moins un projet en tant que coordinateur.trice ou collaborateur.trice, avec en moyenne 3 projets par chercheur.euse sur la période. 66 % des répondant.e.s ont déposé au moins un projet en tant que coordinateur.trice avec une moyenne de 1,3 projets déposés par chercheur.euse.s.

- Lorsque que l'on analyse les projets financés, 49 % des chercheur.euse.s ayant déposé un projet en tant que coordinateur.trice ou collaborateur.trice n'ont pas obtenu de financement. Combinés avec ceux qui n'ont pas déposé de projet, ce sont au total 56 % des chercheur.euse.s qui n'ont obtenu aucun financement de l'ANR pendant la période. Au niveau de la coordination de projet, le taux de succès s'établit à 19 % par projet déposé et ce taux semble relativement stable en fonction des années (entre 16,7 % et 20,6 %). Il est légèrement supérieur au ratio moyen affiché par l'ANR (13 %). Au total, près de 77 % des chercheur.euse.s de la section n'ont pas coordonné d'ANR sur la période considérée.

- La grande majorité des projets coordonnés sont des « projets collaboratifs » (65 %) se distribuant principalement dans le Défi 1 (« Gestion sobre des ressources ») et dans le Défi AS (« Autres Savoirs »). Quelques projets

financés relèvent aussi des Défis 4 et 5 (« Vie Santé Bien-Être ») et « Sécurité Alimentaire »). Dans les Défis 4 et 5, le taux de succès est d'ailleurs sensiblement plus faible que pour les Défis 1 et AS (14 % contre 20 %). Le montant moyen alloué par projet coordonné est de l'ordre de 420 k€.

- Plus de 77 % des chercheur.euse.s sont insatisfait.e.s ou très insatisfait.e.s du fonctionnement de l'ANR, et cette valeur varie peu si l'on restreint l'analyse aux chercheur.euse.s ayant obtenu des financements (68 % d'insatisfaction).

- Plus concrètement, les chercheur.euse.s sont insatisfait.e.s ou très insatisfait.e.s de l'adéquation entre les critères des différents Défis et leurs problématiques de recherche (73 %), de la transparence du système d'évaluation (75 %), de la qualité des reviews (65 %) et, dans une moindre mesure, de la composition des comités d'évaluation (44 %).

Financements ERC:

- Un peu plus de 21 % des chercheur.euse.s de la section 29 ont déposé au moins un projet ERC avec une majorité d'hommes (24 % contre 15 % pour les femmes). 50 % des demandes ont été déposées dans la catégorie « Consolidator » contre 24 % pour la « Starting » et 22 % pour la « Advanced ». Le taux de réussite total est de 29 %: 20 % en Starting, 30 % en Consolidator et 22 % en Advanced.

- A noter: plus de 72 % des chercheur.euse.s sont éligibles uniquement à la catégorie Advanced.

Autres sources de financements:

- *Gros projets (> 100 k€)*: 60 % des chercheur.euse.s ont demandé au moins 1 gros projet pour un taux de réussite totale de 33 %. Il s'agit majoritairement de projets nationaux (55 %) issus des régions, des LabEx et d'organismes privés, suivis de financements européens pour 20 % d'entre eux. En volume, ces projets ont rapporté aux chercheur.euse.s un montant médian de 269 k€ avec une forte dispersion (de 100 à 5 000 k€).

- Petits/moyens projets (< 100 k€) : 85 % des chercheur.euse.s ont demandé au moins un petit projet, que 70 % ont obtenu. Ces projets financés se répartissent principalement entre des financements locaux et nationaux (un tiers chacun), et plus rarement régionaux et internationaux. Le montant médian alloué est de l'ordre de 50 k€ avec là encore une forte dispersion.

Bilan financier global :

- 10 % des chercheur.euse.s ayant répondu au questionnaire n'ont obtenu aucun financement entre 2013 et 2017. Un quart ont obtenu moins de 10 k€/an et un tiers moins de 20 k€/an pour mener leurs activités de recherche. 40 % des jeunes chercheur.euse.s au grade CR2 rentrent dans cette dernière catégorie.

- On notera que le taux d'échec à l'ANR touche là encore principalement les ex-CR2 (60 %), le taux d'échec des ex-CR1 et des DR2 étant de respectivement 43 % et 41 %. Ces chercheur.euse.s qui disposent de faibles moyens pour leur recherche ont pourtant déposé en moyenne 6,5 projets (dont 2,5 projets ANR).

- Au total plus de 63 % des chercheur.euse.s considèrent ne pas disposer des financements suffisants pour être compétitifs sur le plan international. Au niveau des besoins en personnels non permanents, près de 75 % des chercheur.euse.s n'ont pas pu compter sur la collaboration suffisante de personnel IT. Respectivement 69 % et 57 % des chercheur.euse.s n'ont pas pu recruter suffisamment de postdocs et d'étudiant.e.s en thèse.

Conclusions :

- Point relativement positif, le taux de succès moyen à l'ANR des chercheur.euse.s de la section 29 (16-20 %) est légèrement supérieur aux taux moyens (12-13 %). Cet élément ne doit pas masquer le fait que plus de la moitié de nos collègues n'ont bénéficié d'aucun financement de ce type. Près de 80 % des chercheur.euse.s sont d'ailleurs insatisfait.e.s du fonctionnement de cette agence.

- Concernant l'ERC, le questionnaire fait état de taux de succès relativement bons pour notre section : 20 % pour la Starting et 30 % pour la Consolidator. La situation est plus problématique pour la catégorie Advanced : la grande majorité (70 %) des chercheur.euse.s de la Section est uniquement éligible à cette catégorie en raison des limites d'expérience, alors que l'ERC distribue uniquement 8-9 Advanced Fellowships par an en LS8 (Ecology, Evolution). On ne trouve d'ailleurs que 4 lauréats français entre 2013 et 2017.

- Que ce soit comme coordinateur.trice.s ou comme collaborateur.trice.s, 10 % des chercheur.euse.s de la Section n'ont obtenu aucun financement entre 2013 et 2017, un quart d'entre eux réalisent leur activité de recherche avec moins de 10 k€/an et un tiers avec moins de 20 k€/an. Les CR2 sont les plus touchés (40 % d'entre eux). Si cette somme permet de pallier des besoins élémentaires (participation à des conférences, frais de publication, indemnité stagiaire Master, achat de petit matériel de laboratoire etc.), elle ne suffit pas pour mener un projet de recherche dans de bonnes conditions. Enfin, les chercheur.euse.s ont identifié un manque de moyens financiers pour recruter suffisamment de personnels IT, postdocs et, dans une moindre mesure, d'étudiant.e.s en thèse. En conséquence, et de façon inquiétante, près des deux-tiers de nos collègues considèrent ne pas être compétitifs à l'international pour des raisons financières.

L'enquête révèle des situations très contrastées entre collègues. Les financements récurrents des laboratoires restent une ressource essentielle mais congrue pour nombre de chercheur.euse.s. La variabilité des ressources est également renforcée par des financements localement très hétérogènes (présence ou non d'instruments PIA, implication des régions...).

La situation des collègues jeunes recruté.e.s est d'autant plus aberrante qu'ils ont subi un processus de sélection poussé pour être recruté au CNRS. Recruté.e.s pour leurs qualités de chercheur.euse.s conjuguées à l'ambition et la pertinence reconnues de leur projet de recherche, c'est un gâchis humain, scientifique et financier.

Les enjeux scientifiques

Bilan des recrutements (unités, rattachements, thématiques)

De 2015 à 2019, la section 29 a recruté 30 (contre 42 sur la période précédente) chercheur.euse.s (13 CR2, 6 CR1 et 11 CRCN), ce qui correspond en moyenne à 6 postes par an (soit deux de moins que sur la période précédente). Cette période a été caractérisée par la fusion des grades CR2 et CR1 en 2018. Avec seulement deux campagnes de recrutement, le recul est encore insuffisant pour analyser les conséquences de cette fusion.

Les collègues recruté.e.s se répartissent au sein de 20 unités, dont 13 rattachées principalement à la section 29 (22 recrutements), 4 à INEE mais relevant d'autres sections (30, 31), et 3 à d'autres instituts (dont 2 à l'INSB).

Les recrutements reflètent très bien la philosophie de la section 29 énoncée ci-dessus, en couvrant de nombreux domaines et disciplines, mais partageant des bases conceptuelles communes à la communauté, pour appréhender les processus gouvernant la diversité, l'écologie et l'évolution des organismes. Les différentes thématiques de la section sont représentées avec par exemple l'étude de la dynamique de la biodiversité ; la génétique et la génomique des populations appliquées à l'étude de l'adaptation et de la spéciation ; l'évolution des génomes ; l'évolution des formes actuelles et passée ; l'écologie de la santé ; l'écologie comportementale ; l'évolution culturelle ; la biodémographie. La variabilité des échelles, à la fois d'organisation, d'espace et de temps est remarquable, permettant de couvrir les processus évolutifs et écologiques en jeu, du gène à la population, de l'espèce à la communauté, et depuis le temps court jusqu'au temps long. Les approches sont également remarquablement diverses, faisant appel aux outils complémentaires de modélisation, d'ob-

servation sur le terrain, d'expérimentation, de génomique, etc.

Thématiques émergentes

Les thématiques qui suivent ont été identifiées par les membres de la section au regard des nombreux dossiers évalués (de chercheur.es, d'unités et diverses entités...) qui sont venus enrichir notre réflexion. Elles n'ont ni la prétention de faire le tour des thématiques émergentes, ni de faire office de feuille de route. Les thématiques vraiment émergentes sont celles que nous découvrirons demain et qui viendront non pas de larges consultations mais de l'esprit fertile de nos collègues.

1. Description et dynamique de la biodiversité

La description de la biodiversité et la compréhension de son évolution constituent un champ de recherche extrêmement actif mobilisant un nombre croissant de chercheur.euse.s et d'unités de recherche, et qui nécessairement se trouvent à la confluence de nombreuses disciplines. Dans un contexte de modifications anthropiques et climatiques sans précédent, la description de la biodiversité en vue de sa conservation n'a également jamais été autant d'actualité. Au XXI^e siècle, on décrit en moyenne 15 000 nouvelles espèces par an, mais dont seulement 2 000 sont marines, ce qui indique assez clairement l'insuffisance de l'effort alloué à l'exploration de la biodiversité marine, particulièrement dans les habitats peu accessibles.

Pourtant, les avancées tant méthodologiques que technologiques autorisent des avancées spectaculaires dans l'acquisition, le partage et le traitement des données de biodiversité, tant en quantité qu'en qualité, mais aussi leur analyse approfondie à différentes échelles spatiales et temporelles.

Décrire la biodiversité répond tout d'abord à la nécessité de classification du vivant à tous les niveaux de perception, chez les organismes actuels comme fossiles, ce qui couvre les champs de la taxonomie, de la paléontologie et de la systématique. L'avènement des « Omiques » a également permis de mettre en lumière de nouvelles branches du vivant, des « microorganismes » procaryotes ou eucaryotes, susceptibles d'apporter des réponses à la question majeure de l'origine de la vie sur Terre. Cette description du vivant met aussi en lumière des capacités adaptatives originales. Enfin, mieux décrire la biodiversité dans les milieux fortement impactés par les activités humaines, comme en zone urbaine par exemple, permet de mieux appréhender les phénomènes d'introduction d'espèces non-indigènes et leur impact sur la santé des écosystèmes et des humains.

La description de la biodiversité permet également la caractérisation des patrons de distribution de façon à pouvoir inférer les forces qui la font évoluer à différentes échelles de temps, ce qui couvre le champ de disciplines telles que la génétique des populations, la démographie et la biogéographie. Des questions classiques sur les modes de l'évolution de la biodiversité (évolution graduelle ou ponctuée, rôle des facteurs biotiques et abiotiques, rôle des radiations adaptatives, rôle de l'intégration phénotypique) voient un renouveau lié à l'acquisition de données phylogénétiques à des échelles de plus en plus larges et de données phénotypiques nouvelles. Des technologies récentes permettent par exemple d'acquérir à grande échelle des phénotypes complexes (e.g. phénotypes en haute dimension par la morphométrie 3D) et/ou des phénotypes liés au comportement, au mouvement, et à la physiologie. Le développement de méthodes d'analyses de plus en plus sophistiquées, et adaptées à ces données, permettent le test robuste d'hypothèses anciennes, y compris en intégrant des données fossiles et permettant alors d'approcher des processus sur du temps long au-delà de l'information portée par la seule biodiversité actuelle.

2. Le lien micro-macroévolution

Les dynamiques temporelles à différents niveaux d'organisation de la biodiversité (depuis des groupes d'individus jusqu'à des groupes d'espèces) résultent d'un même processus. Cependant les domaines de la micro et de la macroévolution, qui s'intéressent de façon respective aux niveaux intra- et interspécifiques, ont de manière historique été étudiés séparément. Par exemple, si des efforts importants sont menés pour comprendre les processus qui peuvent générer de la différenciation génétique entre populations (supposée être le facteur limitant à la spéciation), comment ces processus modulent effectivement les taux de spéciation est rarement étudié. En regard, les études qui s'intéressent à identifier les facteurs modulant les taux macroévolutifs (e.g. taux de spéciation et d'extinction, taux d'évolution phénotypique) prennent rarement en compte les facteurs intraspécifiques (e.g. diversité génétique, variation des tailles efficaces de populations).

L'étude du passage d'échelle micro à macro est en plein développement, notamment grâce à l'acquisition de données génétiques et/ou génomiques pour des groupes entiers d'espèces. Il génère la description de nouveaux patrons empiriques (e.g. lien entre diversité génétique et taux de spéciation) ainsi que des développements théoriques, notamment pour relier les paramètres clés de la macroévolution (taux de spéciation, extinction, et évolution phénotypique) à des paramètres de la microévolution (taux d'évolution moléculaire, héritabilité, matrice G, etc.). Ces développements sont à la fois importants pour une approche plus mécaniste de la macroévolution et pour une meilleure compréhension des conséquences à long terme des processus microévolutifs.

3. Spéciation : de la zone grise de la spéciation à l'évolution de l'isolement reproducteur

Les approches microévolutives de l'étude du processus de spéciation ont fortement bénéficié de l'explosion des approches empiriques.

riques de génomique des populations basées sur l'analyse du polymorphisme et de divergence entre paires de taxons à l'échelle de génomes entiers. A partir de ce type de jeux de données, la généralisation d'outils d'inférence *a posteriori* permet de tester explicitement différents modèles alternatifs de divergence post-spéciation, concernant notamment les scénarios de réduction historique des flux de gènes. Ces approches permettent de quantifier cette dynamique de réduction des flux de gènes et ont permis d'identifier une zone critique le long du gradient de divergence nucléotidique entre paires de taxons au sein de laquelle cette réduction de flux de gènes s'opère, appelée la « zone grise de la spéciation ». La dynamique d'apparition des barrières reproductives à travers le génome fait également l'objet d'études intensives en combinant des approches de type « top-down », en partant de la variation des phénotypes d'incompatibilités et en utilisant des approches de type QTL ou de cartographie d'association pour identifier les déterminants moléculaires sous-tendant les barrières reproductives, et des approches « bottom-up », au travers de scan génomiques de différenciation cherchant à identifier des « îlots de spéciation ». L'interprétation des résultats de ces dernières approches nécessite cependant des précautions importantes suite à la démonstration du rôle non négligeable de la sélection indirecte (au travers des processus d'autostop moléculaire ou de sélection d'arrière-plan) pouvant générer des signatures de forte différenciation dans les régions génomiques à faibles taux de recombinaison.

4. Génomes complets et espèces non-modèles

L'accès plus large aux technologies de séquençage à longs fragments pour des espèces non-modèles permet maintenant d'explorer de manière approfondie certaines régions génomiques restées récalcitrantes jusqu'à présent. Notamment les régions non-recombinantes le long des chromosomes sexuels peuvent être étudiées plus en détail et permettent de révéler une importante dyna-

mique temporelle d'extension de ces régions non-recombinantes, ou, dans certains groupes, d'évolution récurrente de nouveaux chromosomes sexuels à partir de différents autosomes et leurs conséquences sur l'évolution des systèmes de reproduction (e.g. évolution de la dioécie chez les plantes). L'apparition privilégiée de barrières reproductives au sein de ces chromosomes sexuels comparativement aux autres régions du génome fait également l'objet de travaux intensifs.

En parallèle des études utilisant des génomes complets d'espèces modèles (e.g. *A. thaliana*), des études sur espèces non modèles se développent maintenant pour identifier l'architecture génétique de traits complexes (nombre, effet et position des gènes). La combinaison de ces informations génétiques et des approches d'écologie évolutive (jardins communs, expérimentations in situ) permet de mieux comprendre les mécanismes de maintien de la variabilité génétique en populations naturelles (flexibilité de l'architecture génétique entre populations).

5. Du génotype aux phénotypes, plasticité (et ses supports) vs. adaptation

Malgré une existence relativement ancienne de la théorie de l'évolution d'une part et de la génétique mendélienne d'autre part, et malgré l'apparente simplicité du mécanisme de sélection naturelle, nombre de subtilités sur les mécanismes génétiques de l'évolution adaptative nous échappent encore sur les liens entre phénotype, génotype et environnement.

Il est nécessaire de caractériser le phénotype de manière systématique et aussi exhaustive que possible en termes de nombre de caractères, diversité des environnements, et temporalité des réponses. Ainsi, l'étude de l'adaptation entre dans l'ère de la phénomique. L'utilisation des nouvelles technologies de séquençage permet maintenant de comprendre l'architecture de traits complexes (distribution des effets des allèles et des fréquences alléliques, la base la variabilité génétique),

mais a montré que cette architecture est contexte-dépendante (notamment selon l'environnement). Or cette architecture est centrale dans les modèles de biologie évolutive. De manière concomitante, au-delà de l'écologie et de l'évolution, le dogme initial de l'évolution moléculaire, impliquant une relation causale simple entre un gène, un ARN messager, une protéine et une fonction, a été progressivement remplacé par une vision plus dynamique, qui tient compte de changements des niveaux d'expression des gènes au cours de la vie (notamment du développement) et en réponse à l'environnement. Ceci tend naturellement vers une vision plus plastique du déterminisme génétique des caractères, illustrée à travers un nombre croissant d'études de transcriptomique en environnements contrastés. De plus, des modifications héréditaires mais non liées à la séquence d'ADN jouent un rôle important dans des processus biologiques très divers avec des conséquences développementales, phénotypiques, écologiques et évolutives variées. Ce domaine naissant de l'épigénétique est en train de jouer un rôle clé dans notre compréhension des mécanismes moléculaires reliant génotype et phénotype, en particulier en ce qui concerne la biologie du développement et la relation environnement-phénotype. L'importance de l'épigénétique pour l'adaptation des populations reste cependant à évaluer tant d'un point de vue théorique qu'empirique.

Ces éléments ont remis sur le devant de la scène la notion de plasticité phénotypique (la capacité d'un génotype à produire plusieurs phénotypes en fonction de l'environnement dans lequel il se développe ou s'exprime). Celle-ci contribue fortement aux changements phénotypiques rapides observés *in natura*, que l'on attribuait parfois trop rapidement à des réponses à la sélection naturelle. Caractère à part entière, génétiquement variable, la plasticité phénotypique peut être sélectionnée en environnements hétérogènes et jouer un rôle central dans l'écologie et la persistance des espèces en environnement changeant. Elle peut également influencer les trajectoires évolutives, la diversification phénotypique et la macroévolution. L'intérêt croissant pour la plasticité phénotypique se traduit par un foisonnement de

questions qui traversent la biologie (biologie du développement, génétique, biologie évolutive, écologie) et les sciences humaines (histoire des sciences, anthropologie, philosophie).

6. Les composantes de l'hétérogénéité individuelle et ses conséquences

La réponse et l'adaptation des organismes aux changements de leur environnement ont été majoritairement abordées à l'échelle des espèces et des populations. Or les processus sous-jacents peuvent être affectés par l'hétérogénéité individuelle. Ainsi, tous les individus d'une population ne montrent pas la même plasticité phénotypique [réponse] vis-à-vis d'un stress [d'un changement/ d'une variation d'environnement], affectant ainsi la nature et la diversité des mécanismes adaptatifs retenus par la sélection. Jusqu'alors souvent considérés à l'échelle populationnelle, les mécanismes adaptatifs et la plasticité phénotypique peuvent aujourd'hui être appréhendés au niveau individuel, notamment grâce au développement des outils de phénotypage et de génotypage à haut débit (e.g. single cell sequencing). Ces approches permettent notamment de mieux appréhender l'impact du « bruit génétique » sur les phénotypes moléculaires (e.g. variations individuelles d'expression des gènes) et comment ces variations impactent le phénotype global, les traits d'histoire de vie, et les trajectoires adaptatives des populations selon la fréquence et la prédictibilité des changements (constant, cyclique ou stochastique). Ces questions sont pour l'instant majoritairement abordées grâce à des approches d'évolution expérimentale utilisant des modèles adaptés (algues, bactéries, levures), bien que la prise en compte de l'hétérogénéité individuelle dans les études de terrain et les approches théoriques tende à se généraliser.

7. Lier génétique et biodémographie

Bien qu'étant liées par le principe de sélection naturelle des individus, les recherches en génétique quantitative et en démographie sont

restées jusqu'alors relativement cloisonnées. D'un côté, les modèles démographiques permettent aujourd'hui de décrire la dynamique d'un trait phénotypique d'une population d'organismes, tout en prenant en compte le recrutement, la croissance et la sélection de viabilité des individus. La composante génétique est alors simplement appréhendée via la corrélation entre les phénotypes parents-enfants. De l'autre, la génétique quantitative décrit la résultante des associations génotypes / phénotypes sans prendre en compte le détail des processus démographiques sous-jacents.

Les études empiriques basées sur les suivis individuels à long terme ont mis à jour les limites actuelles dans nos capacités à prédire les variations d'abondance des populations ou des traits phénotypiques des espèces. Une meilleure compréhension de l'évolution phénotypiques au sein des populations, par exemple lorsque l'on s'intéresse aux changements en taille des organismes en réponse aux changements globaux, nécessite une meilleure intégration de l'hérédité génétique (héritabilité) et une prise en compte plus fine des liens complexes entre le génotype et le phénotype (*e.g.* plasticité phénotypique, épigénétique) dans les modèles démographiques. Il y a aujourd'hui un besoin de recherches se trouvant à l'interface de ces deux disciplines majeures de l'écologie afin de mieux prédire les dynamiques éco-évolutives des traits d'histoire de vie, des comportements ou encore des traits fonctionnels des espèces.

8. Dynamique éco-évolutive des systèmes hôtes-pathogènes

Lorsque les pathogènes évoluent rapidement, la dynamique épidémiologique et la dynamique évolutive se produisent aux mêmes échelles temporelles. Au cours d'un événement épidémique, des mutations sont générées *de novo* chez le pathogène. Ces mutations peuvent se propager à travers la population de pathogènes, créant ainsi un lien réciproque entre le polymorphisme génétique du pathogène et sa propension à se transmettre

au sein d'une population hétérogène d'hôtes. De ce fait, pour bien comprendre la progression des maladies, il devient nécessaire d'étudier conjointement l'épidémiologie et l'évolution des agents infectieux.

Le domaine de l'épidémiologie évolutive est en plein essor, grâce au développement de nouveaux modèles théoriques dynamiques et des nouvelles technologies de séquençage à haut débit. Leur combinaison permet pour la première fois de combiner la surveillance épidémiologique traditionnelle avec des analyses évolutives à une échelle très fine incorporant des outils du domaine de la phylogénie (phylogénétique). L'objectif commun de ces travaux est d'expliquer la distribution de la variation génétique des pathogènes dans le temps et dans l'espace, de permettre l'estimation des propriétés épidémiologiques des pathogènes à partir des données génétiques, et d'aider à prévoir l'apparition de nouvelles épidémies.

9. L'individu communauté

Ces dernières années ont vu un changement de paradigme dans le domaine de l'écologie et de l'évolution des maladies infectieuses. Les études basées sur les interactions entre un hôte et un parasite ont cédé la place à des approches plus réalistes basées sur le fait que, dans la nature, les infections impliquent de multiples hôtes, parasites et symbiotes.

Des travaux en conditions contrôlées sur le terrain et au laboratoire montrent que les infections multi-hôtes et multi-parasites peuvent avoir des conséquences dramatiques sur la virulence et la transmission des parasites à des échelles temporelles courtes. En parallèle, des modèles théoriques suggèrent que l'évolution et la dynamique épidémiologique des maladies multi-hôtes et multi-parasites diffèrent considérablement de celles prévues dans les modèles impliquant un seul hôte et un seul parasite.

Enfin, la mise en évidence du rôle clé du microbiote de l'hôte dans la résistance et la

tolérance aux pathogènes inscrit naturellement l'hôte comme une communauté d'organismes qui répond à l'infection. En revanche, si de nombreux travaux portent sur la diversité et l'importance fonctionnelle du microbiote, nous avons encore peu de prédictions sur son rôle dans la dynamique des maladies à l'échelle écologique et évolutive, avec notamment les conséquences possibles de cette immunité conférée par le microbiote sur l'évolution du système immunitaire lui-même.

Perspectives de valorisation

Les crises environnementales actuelles, que ce soit la crise de biodiversité ou encore celle, plus récente et espérons plus brève, liée à la Covid-19, placent les thématiques de la section 29 au centre d'enjeux particulièrement importants qui appellent une implication des scientifiques de notre communauté à de multiples niveaux de la société. Nous pourrions analyser l'ensemble des domaines dans lesquels les recherches réalisées par les chercheurs.euse.s et laboratoires de la section ont des implications, que ce soit en termes de conservation, de gestion de populations, de patrimoine (*e.g.* dans le cadre des parcs et réserves naturels, de la pêche, mais aussi des espèces invasives, des ravageurs, des vecteurs...), de la gestion et de la prévention des émergences de pathogènes et des épidémies, de santé unique, globale et des écosystèmes en lien avec les multiples expositions auxquelles nous sommes confrontés, ou encore de la place de l'humain dans la nature et son rapport au monde aujourd'hui et dans son histoire... La liste est (trop) longue, mais elle est néanmoins largement connue. Aussi, nous préférons regarder comment notre communauté s'investit en termes de valorisation.

La première manière concerne l'interaction avec les citoyen.ne.s et prend des formes très diverses, depuis l'information, la médiation scientifique, jusqu'au développement des sciences participatives et enfin des sciences citoyennes. La seconde est en lien direct avec

les partenaires institutionnels (*e.g.* gestionnaires d'Espaces Naturels, collectivités territoriales, ministères...) et va du conseil à l'aide à la prise de décision. L'extension naturelle est la participation à des structures internationales comme par exemple le GIEC, l'IPBES ou l'IUCN où plusieurs membres sont impliqués. Enfin, l'interaction avec les industriels constitue un dernier élément possible de la valorisation.

Plus généralement, la crise environnementale que nous vivons, et dont les travaux de notre communauté participent largement à la compréhension et la mesure des conséquences, entraîne chez une partie des chercheurs.se de la section un questionnement particulier quant à la place de la recherche, et de la leur en particulier, au sein de la société. Comment étudier, mesurer, identifier les mécanismes à l'origine des crises biologiques et environnementales et proposer des solutions pour celle, actuelle, liée à l'anthropocène sans questionner aussi nos propres pratiques et agissements. Ces questionnements mériteraient une réflexion dédiée qui pourrait faire partie des prochains ateliers de perspectives de l'InEE.

Interfaces disciplinaires

L'analyse des candidatures aux concours de recrutement des CR et DR de la 29, et des projets de recherche développés par les candidat.e.s et les chercheurs.euse.s de la section fait apparaître des recouvrements thématiques avec d'autres sections. Ces recouvrements sont partiels et concernent les sections et thématiques suivantes :

- Section 21 (organisation, expression, évolution des génomes, bioinformatique et biologie des systèmes). Les développements en paléogénomique, phylogénomique, génomique comparative grâce à l'utilisation des outils omiques et bioinformatiques développés en 21 servent la compréhension de l'organisation et le fonctionnement du génome alors que les questions abordées en 29 s'attachent à l'origine et la dynamique de la biodiversité.

- Section 23 (biologie végétale intégrative). Certains aspects d'écophysiologie végétale évolutive, mais également d'interaction plantes-microorganismes sont représentés en 23 et en 29. Néanmoins, elles sont abordées en section 29 au-delà du modèle végétal.

- Section 27 (relation hôte-pathogène, immunologie, inflammation). Les interactions évolutives hôte-microbes-pathogènes (microbiote), l'évolution et la dynamique de la pathogénicité des virus, bactéries sont représentées en 27 et en 29. Le questionnement en 29 met en avant la nature changeante et dynamique des interactions et leurs aspects populationnels.

- Section 30 (surfaces continentales et interfaces). Les recouvrements concernent l'écotoxicologie lorsque les aspects adaptatifs et évolutifs sont abordés, mais aussi la microbiologie environnementale (étude biodiversité ou écologie de la santé), la paléoécologie et la dynamique des communautés et des écosystèmes lorsque des aspects de biodiversité, d'évolution et d'adaptation sont évoqués, et enfin l'écologie fonctionnelle et services écosystémiques. Sur ces derniers aspects, un risque est identifié de voir certains projets à la marge des deux sections finalement exclus.

- Section 31 (Homme et milieux : évolution, interactions). Le recouvrement porte essentiellement sur les questions d'évolution humaine par des approches génétiques et génomiques.

- CID 51 (Modélisation, et analyse des données et des systèmes biologiques : approches informatiques, mathématiques et physiques). Si la section 29 est très ouverte à la modélisation et aux aspects théoriques, les aspects les plus méthodologiques ne sont que partiellement couverts par la Section 29 et la Section 51 lui est parfaitement complémentaire sur ces aspects là, si tant est que les postes soient accessibles pour les laboratoires InEE.

- CID 52 (Environnements sociétés : du fondamental à l'opérationnel). Il y a recouvrement possible avec les thématiques de l'écologie de la conservation, de l'écologie de la santé et des services écosystémiques.

On retrouve également quelques candidat.e.s en commun avec les sections 20 (biologie structurale), 22 (evo-devo) et 26 (comportement).

En conclusion, rien ne faisant sens en biologie si ce n'est à la lumière de l'évolution, les thématiques de l'écologie et de l'évolution résonnent dans de nombreuses autres sections, notamment en sciences de la vie, et la section 29 est naturellement connectée à d'autres, au moins pour cette raison, ou pour le partage d'outils méthodologiques ou d'objets d'étude communs. Loin d'être problématiques, ces recouvrements sont au contraire séminaux, et assurent la couverture de la diversité des champs de recherche, à l'exception peut-être du point de vigilance signalé avec la section 30. On peut craindre que la baisse récurrente du nombre de poste au concours aboutisse à la disparition des recrutements sur les marges fertiles des sections.

En conclusion, la section 29 ne présente pas de redondance gênante avec une section particulière et les contours de la section ne sont pas à remettre en cause. Elle est identifiée comme la section où les questions d'ordre évolutif sont abordées. Son unité repose aussi sur le manie-ment d'un corpus de concepts partagés, et sur la large place de la question de la variabilité (des génotypes et des phénotypes), de sa distribution, et de sa dynamique temporelle.

Travail de section

La mandature fait apparaître un alourdissement de la charge de travail avec la multiplicité et la redondance des évaluations entre sections. Cela concerne notamment l'évaluation des unités ou structures de recherche (création et/ou renouvellement de GDR, GDRI, LIA, ET, ZA, etc.) dont le périmètre se situe en limite de section et/ou pour lesquels peu de chercheur.euse.s de la section sont impliqué.e.s. Il serait utile de limiter le nombre de sections consultables sur un même dossier, ou de déterminer,

pour les dossiers multi-sections, le périmètre sur lequel la section est consultée.

Dans le cadre des réflexions en cours sur l'évaluation, une refonte des trames de rapports est également à envisager. Si nous voulons privilégier encore le qualitatif, l'évaluation des travaux de recherches pourrait porter uniquement sur une présentation de travaux majeurs choisis en nombre limité.

La mise en place d'un jury d'admissibilité pour le concours DR permettrait d'écarter les dossiers/candidats hors section ou bien ne satisfaisant pas aux critères de recrutement tels que définis et affichés par la section.

Les outils à la disposition de la section ne facilitent pas le travail collégial. Par exemple nous déplorons que tous les dossiers ne soient pas accessibles à tous les membres de la section alors que c'est bien la section dans son ensemble qui rend un avis et pas les seuls rapporteur.euse.s ou une catégorie de personnel. Enfin, des efforts ont été réalisés durant la mandature par la section pour intensifier la communication (descendante et ascendante) avec les chercheur.euse.s. Cet effort a notamment porté sur une communication accrue avec les chercheur.euse.s, mais aussi une enquête de satisfaction sur le financement de la recherche et la diffusion de comptes-rendus / lettres d'informations à destination de la communauté. Ces efforts doivent certainement être poursuivis et amplifiés avec la mise en place d'une page web permettant un accès permanent aux informations de la section.

Moyens et défis

Description de la biodiversité et suivis à long terme

Les grands défis posés par l'étude des changements globaux ne peuvent être relevés qu'en mettant en œuvre les capacités de notre com-

munauté de scientifiques à explorer et décrire la biodiversité, ce qui oblige à limiter l'érosion de l'expertise taxonomique à laquelle on assiste depuis deux décennies.

En milieu océanique, cela passe aussi par le maintien de nos capacités d'exploration, particulièrement de nos accès à la flotte océanographique et aux engins de plongée habitables (e.g. Nautilo) ou téléopérés. De manière concomitante, les suivis à long terme des paramètres environnementaux, de paramètres biologiques de description de la biodiversité (e.g. distribution des espèces, variation de la diversité génétique, suivis individu-centrés) et de paramètres sociologiques, ont montré toute leur puissance en alimentant des travaux de modélisation du changement global et de ses conséquences sur la biosphère. Ces défis nécessitent donc de l'instrumentation et des infrastructures pensées sur le long terme et soutenues (financièrement et humainement) sur le long terme. Le système de financement actuel, principalement sur projet, met en péril ces recherches au long cours pourtant particulièrement nécessaires. Ces soutiens apparaissent encore plus importants si notre communauté veut réussir une bonne application du protocole de Nagoya.

Des développements importants sont en cours pour permettre la mesure d'un grand nombre et d'une grande diversité de paramètres en continu de manière autonome *in situ* dans des conditions parfois difficiles. Les solutions portent à la fois sur la source d'énergie, la connectique, la transmission des données (aspect mode et logiciel) et les capteurs (développement de capteurs communiquant et intelligents). Si les possibilités offertes sont importantes, la rationalisation des coûts (financiers, écologiques) au regard des attendus, et l'anticipation des enjeux liés à l'accumulation et à l'utilisation de ces données sont nécessaires.

Le développement des sciences participatives concourt également à cette accumulation de données, tout en connectant recherche et société. Le travail mené pour la standardisation des protocoles et l'analyse des données issues de ces suivis permet aujourd'hui d'en récolter les fruits.

Big data, bio-info, intégration données hétérogènes

L'accès croissant à des données morphologiques, écologiques et génétiques, mais également environnementales, à grande échelle offre de nouvelles opportunités, mais pose aussi des défis en termes i) de standardisation, gestion et partage des bases de données et ii) d'intégration de données hétérogènes.

Au même titre que dans de nombreuses autres disciplines, les méthodes d'apprentissage permettent des avancées en écologie et biologie évolutive. Leur application pour faire de la classification ou de la reconnaissance d'images permettent un changement d'échelle dans l'acquisition de données (*e.g.* données de biodiversité, données comportementales). Elles se montrent également particulièrement utiles pour la modélisation de séries chronologiques, et pourraient jouer un rôle important pour établir des scénarios prédictifs dans un contexte de changement global. Certaines applications en génétique des populations, épidémiologie, phylogéographie et phylogénétiques sont également en cours de développement.

Ces éléments soulignent la nécessité de maintenir un lien fort avec les développements méthodologiques en mathématiques, statistiques et informatiques, au travers notamment des interactions avec la CID 51.

Partage des données

Le partage des données en science (mouvement *Open Data*) est une tendance lourde de cette dernière décennie qui, bien qu'elle soit largement acceptée dans de nombreuses disciplines, rencontre une certaine opposition en écologie. La plupart des agences de financement et des journaux demandent, avant même l'acceptation de publication, que les données utilisées soient accessibles sur un ser-

veur de données public approprié (Dryad, PANGAEA, GeneBank...) dans un souci de transparence et répliquabilité des analyses et des recherches au sens large. Il est pourtant indéniable que le partage de données actuel permet de mutualiser les efforts de collecte de l'information à une échelle jusque là inégalée en écologie, et d'appréhender les questions scientifiques avec une généralité et une complexité nouvelle avec l'avènement du *Big Data*. De manière générale, la complexité croissante des analyses et l'utilisation d'outils informatiques relativement complexes devraient aller de pair avec le partage du code source utilisé par les auteurs. Bien entendu, le dépôt de données sur des serveurs étrangers ou privés pose la question de la pérennité de l'initiative, tout comme celle de l'utilisation des données.

Ce mouvement est évidemment à mettre en relation avec le mouvement d'Open Science où la question de la publication des résultats scientifiques et de leur accès sont en première ligne. Attachée à l'évaluation par les pairs, la Section soutient fortement le développement de méthodes alternatives de publication. Citons par exemple l'initiative Peer Community In... dont le fonctionnement permet à la fois une évaluation critique des résultats de manière transparente et une gratuité du processus de publication et d'accès. Les publications PCI sont d'ailleurs considérées au même titre que les publications dans des revues indexées pour l'évaluation et le recrutement par la section 29.

Outils (structures type ZA, OHM, etc.) et leurs intégrations

Les différents outils tels que les Zones Ateliers ou les Observatoires jouent un rôle essentiel pour le développement de programmes de recherche nationaux et internationaux et l'activité de chercheur.ses. A différentes échelles spatiales et temporelles, ils permettent de décrire la complexité des réponses organismes et de leurs communautés, mais servent égale-

ment de structures de soutien pour aborder concrètement, et de manière objective, les nouvelles questions qui surgissent au sein de la communauté. Ces moyens permettent de générer une approche pluri-disciplinaire essentielle pour décortiquer la complexité des phénomènes observés. Ainsi peuvent se mettre en place des équipes du CNRS qui, en collaborations locale et internationale, développent les travaux nécessaires pour comprendre la biodiversité et ses changements. Un point important est en effet la compréhension de la dynamique de la biodiversité et des processus sous-jacents à son évolution en lien non seulement avec des conditions écosystémiques très différentes (zone tempérée vs zone tropicale, par exemple) mais surtout dans différents contextes d'anthropisation. Enfin ces outils servent à aider réellement les décideurs et jouent un rôle majeur de formation qui ne doit pas être négligé.

Emploi et moyens de la Recherche

Au fil des évaluations et par les enquêtes menées, nous constatons une triste réalité partagée de l'état de la recherche dans notre communauté et dont fait aussi état :

- Des laboratoires avec des besoins criants en personnel IT pérenne et une perte de compétence IT qui continuent de s'éroder.

- Des chercheur.euse.s sans les moyens de leur recherche et une part prégnante du temps dédiée à la recherche de financement et non à la recherche.

- Une précarisation accrue et la faiblesse de perspective d'emploi qui voit les meilleurs éléments formés dans nos laboratoires devoir abandonner leurs ambitions dans la recherche.

- Un mal être croissant induit chez les personnels permanents et contractuels, qui se tra-

duit par des situations de souffrance au travail et parfois de burn out.

Pour conclure sur la conjoncture en 2020

La communauté qui relève de la section 29 est bien identifiée et sa visibilité peut-être mesurée y compris par des indicateurs tristement classiques (positionnement des universités dans les classements internationaux, chercheur.es fortement cité.e.s, lauréat.e.s d'appel d'offre prestigieux...). Cette visibilité internationale a encore été renforcée par l'organisation et la tenue du congrès *Evolution* en 2018.

Néanmoins et malgré cette excellence reconnue, notre communauté est inquiète. Elle est inquiète non seulement des conséquences des changements globaux qu'elle mesure chaque jour, mais aussi de l'absence d'engagements adaptés pour une recherche indépendante et sereine qui seule peut permettre de mieux comprendre et répondre aux enjeux de demain. Au contraire, elle constate que l'écosystème de recherche se détériore, mettant toujours plus la compétition au centre du jeu, et que les moyens de la recherche ne sont pas suffisamment largement répartis et distribués sur la recherche fondamentale, et qu'ils sont soumis à des systèmes d'attribution chronophages et trop arbitraires. Ces systèmes impactent la qualité de la recherche et les conditions de sa réalisation. Elle est également inquiète de voir que les politiques d'emploi permanent IT et chercheur.euse.s continuent à accentuer la diminution des effectifs dédiés à la recherche.

C'est pour ces raisons, que nous nous opposons à la LPPR telle que proposée et comme nous l'avons fait savoir par la motion du 3 mars 2020.

SECTION 30

SURFACE CONTINENTALE ET INTERFACES

Composition de la section

Gudrun BORNETTE (présidente de section), Pierre LABADIE (secrétaire scientifique), Pierre BARRE, Patricia BENTOZA, Isabelle BIHANNIC, Olivier BOUR, Luc DESCROIX, Stéphanie DESPRAT, Florence DONNADIEU-BERNARD, Jerome DUVAL, Evelyne FRANQUET, Stephan HATTENSCHWILER, Laurent JEANNEAU, Eric LAJEUNESSE, Annet LVERMAN, Guillaume MORIN, Florent MOUILLOT, Nathalie NIQUIL, Soizic PRADO, Agnès RICHAUME-JOLION, Téléspore SIME-NGANDO.

Résumé

La section 30 rassemble les chercheurs dont les thématiques de recherche portent sur le fonctionnement des surfaces et interfaces continentales, et sur les problématiques d'écologie fonctionnelle. Les chercheurs relèvent de très nombreuses disciplines, et les combinent pour comprendre le fonctionnement de cette zone critique à différentes échelles d'espace et de temps. La section est par essence interdisciplinaire, fortement ancrée dans les sciences physiques, chimiques, et biologiques. Le rapport souligne les forces en présence au sein de la section, et dans les candidatures au CNRS demandant le rattachement à cette section, décrit les points forts de la communauté CNRS, mais également les points d'amélioration en termes de champs thématiques couverts.

Introduction

Les statistiques figurant dans ce rapport concernent les 209 chercheurs rattachés à ce jour à la section 30 et évalués lors des sessions de printemps 2017, 2018 et 2019 et d'automne 2017 et 2018. Le nombre de chercheurs total rattachés à la section est de 260. Les statistiques peuvent ainsi être légèrement modifiées en considérant la totalité des chercheurs de la section 30. Cependant, en considérant 80 % des chercheurs de la section, cet exercice permet d'obtenir une image réaliste du champ « Surfaces et Interfaces Continentales » en France.

Le périmètre de la section est abordé tout d'abord sur le plan des ressources humaines, et décrit la répartition des chercheurs rattachés à la section 30 par rapport à leur âge et à leur sexe. Dans une deuxième analyse, le périmètre scientifique est présenté sur la base des

209 chercheurs. Chacun des 209 dossiers considérés a été évalué lors d'une des cinq sessions précédentes du mandat de la section par un rapporteur. Celui-ci a indiqué la thématique scientifique principale (parmi une liste de 8) ainsi que deux mots-clés (parmi une liste de 23). La répartition par thématique principale a été utilisée pour répartir les effectifs. De cette répartition ont été extraits les réseaux de thématiques et de mots-clés permettant de visualiser et de quantifier les interactions entre thématiques et entre mots-clés. Pour les interactions entre thématiques, chaque mot-clé a été transformé en sa thématique de rattachement résultant pour chaque chercheur en une liste de trois (au plus) thématiques, celles-ci pouvant être similaires ou pas.

I. Ressources humaines de la section

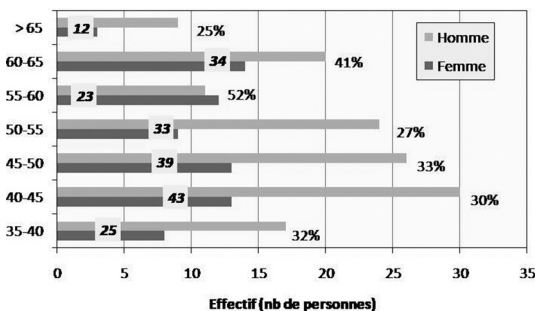


Figure 1 : Pyramide des âges répartis par sexe des chercheurs de la section 30. Le nombre en italique sur fond gris donne l'effectif total d'une classe d'âge, et la proportion de femmes dans chaque classe d'âge est donnée par le pourcentage. Parmi les quatre catégories d'âge les plus jeunes, la proportion de femmes est comprise entre 27 et 33% alors qu'elle est supérieure à 40% chez les 55-65 ans. La moyenne d'âge des chercheurs de la section 30 est de 50 ± 9 ans sans considération de sexe. Sur les 209 dossiers évalués, les femmes représentent 34% de l'effectif et 40% d'entre elles sont DR. Cette proportion monte à 47% chez les hommes. La tranche d'âge 55-60 ans est la seule pour laquelle l'équilibre homme femme est réalisé. Le déséquilibre en faveur des hommes est particulièrement accentué pour les chercheurs de moins de 55 ans, ce qui traduit un déséquilibre structurel des recrutements en faveur des hommes au cours des derniers mandats de la section.

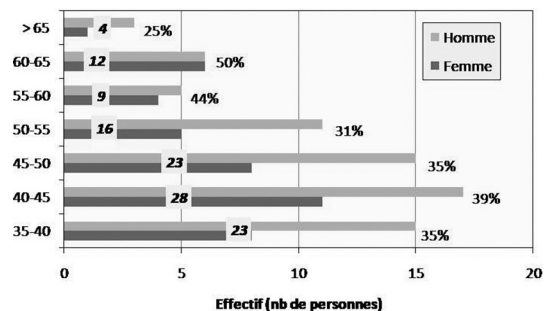


Figure 2 : Pyramide des âges répartis par sexe des CR de la section 30. Le nombre en italique sur fond gris donne l'effectif total d'une classe d'âge et la proportion de femmes dans chaque classe d'âge est donnée par le pourcentage.

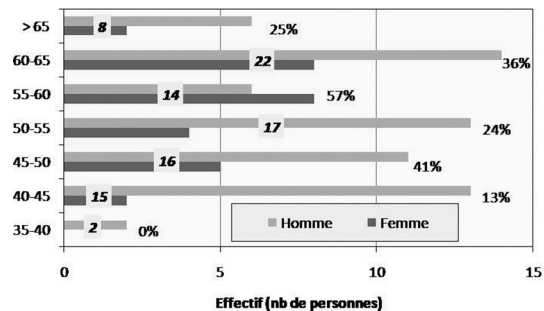


Figure 3 : Pyramide des âges répartis par sexe des DR de la section 30. Le nombre en italique sur fond gris donne l'effectif total d'une classe d'âge et la proportion de femmes dans chaque classe d'âge est donnée par le pourcentage. L'âge moyen du changement de corps CR-DR est de 44 ans quel que soit le sexe.

Les femmes représentent 30% des DR, et 37% des CR. Le déséquilibre homme-femme au recrutement se transmet et se renforce au passage CR-DR. Par contre, il ne s'aggrave pas au fil de la progression de carrière (DR2 26%; DR1 23%; DRCE 24%).

Lorsque l'on s'intéresse au nombre d'années moyen qu'ont passé les femmes et les hommes au grade CR avant d'accéder au grade DR (table 1), on constate que ce nombre est comparable pour certaines classes d'âge (40-44 ans, 50-54 ans, 60-64 ans), mais significativement plus élevé pour d'autres (45-49 ans, 55-59 ans). On constate également que même si la proportion de femmes DR dans la

classe d'âge 55-60 est plus proche de la parité, les femmes, dans cette classe d'âge, ont attendu 5,5 ans de plus que les hommes pour atteindre ce grade (table 1), ce qui démontre qu'il n'y a pas eu de biais positif en faveur des femmes, même dans cette classe d'âge.

La section est fortement préoccupée par ce déséquilibre de recrutement et de carrière entre hommes et femmes, et s'interroge sur les éventuels biais dans les critères de sélection pouvant défavoriser les femmes. Cette variation inter-classes d'âge peut ainsi être due au hasard des promotions, mais pourrait aussi résulter de la variabilité de la composition des sections, en termes de comportement vis à vis de la parité, certains « crus » de la section pouvant être plus attentifs que d'autres à l'égalité de carrière des hommes et des femmes. En moyenne, à l'échelle de l'ensemble des classes d'âge, on constate que les femmes attendent 2 ans de plus que les hommes pour passer DR. Cet écart est-il dû à un dossier moins fourni ou à un comportement sexiste ? C'est difficile à dire à ce degré d'analyse. Si on considère que le nombre moyen d'enfants par femme est de 2 en France, on peut faire l'hypothèse que cela peut contribuer à un retard de carrière conduisant à une promotion plus tardive.

Table 1 : Nombre d'années passées dans le grade CR pour les femmes et pour les hommes, et âge de passage DR, dans la section 30 pour chaque classe d'âge.

	Nombre d'années CR Femmes	Âge de passage DR Femmes	Nombre d'années CR Hommes	Âge de passage DR Hommes
35-39			9	38.5
40-44	7.5	39.5	8.7	39.8
45-49	14.8	42.8	9.4	42.4
50-54	11.5	43.5	12.9	45.2
55-59	18.1	46.4	12.5	45.5
60-64	15.3	44.9	15.9	46
65+	11	42.5	14.2	46.3
Moyenne	14	44.2	12	43.8

Le pourcentage de DR au sein d'une classe d'âge passe de 8% pour les 35-40 ans à 35% pour les 40-45 ans en lien avec l'âge moyen de 44 ans pour le changement de corps CR-DR. Cette proportion de DR au sein d'une classe d'âge augmente d'un facteur 1.2 par classe d'âge jusqu'aux 55-60 ans pour atteindre 61% de la classe d'âge. Cette proportion passe à 65 et 67% chez les 60-65 ans et les plus de 65 ans, respectivement. Le pourcentage de DR par classe d'âge (Figure 4) montre une forte différence de distribution entre les hommes et les femmes, mettant en évidence un décalage dans l'âge de la transition de CR à DR. Les hommes commencent à postuler et à passer DR plus tôt que les femmes et on observe un décalage de 5 années de l'âge où ils deviennent DR, puis un rééquilibrage se fait au niveau de la classe d'âge 45-50 ans, voire plus tard, comme souligné précédemment. La question reste posée de la nature de ce déséquilibre inégalement réparti dans le temps.

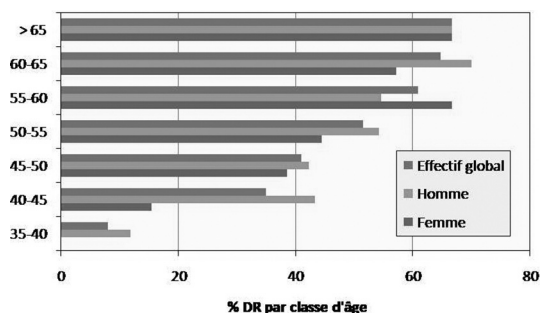


Figure 4 : Pourcentage de DR parmi les chercheurs de la section, selon les différentes classes d'âge.

Le pourcentage pour les 35-40 ans est de 0% pour les femmes. La section analyse actuellement les moyens à mettre en œuvre pour résoudre ce problème de déséquilibre. Une réflexion inter-sections, initiée par la section 14, a souligné que la considération des traits qualitatifs (nature exacte de la prise de responsabilité collective), en sus des critères quantitatifs permettrait de mesurer le réel investissement et la réelle charge de travail induite par ces charges déclarées. Cette idée est en cohérence avec la façon dont la section 30 a posé les questions lors des oraux des

concours DR, en accordant une place importante aux questions aux candidats sur leur « vision » des responsabilités collectives, et la manière dont ils s'impliquent et mettent en œuvre ces responsabilités. Nous avons cependant toujours un déficit de candidatures féminines. Un travail est nécessaire avec les DAS et les équipes de direction des structures de recherche pour veiller à laisser/encourager les femmes à prendre des responsabilités collectives valorisantes dans les laboratoires, ou tout simplement à penser à elles quand on est en recherche d'une personne prête à prendre une responsabilité collective. Les exemples sont nombreux de femmes assumant des responsabilités collectives en soutien à un collègue, sans pouvoir l'afficher, et qui se voient déniées la possibilité de prendre cette responsabilité lors du départ du collègue, et ce au profit d'un homme. Outre le fort encouragement des femmes à postuler, une évolution est encore possible pour tenir compte de charges collectives aujourd'hui peu valorisées même si elles sont utiles à la communauté. Par exemple, on peut envisager la prise en compte de responsabilités telles que les responsabilités de collections, de cultures d'organismes ou d'organisation de bases de données. Ces tâches lourdes sont des exemples de celles rencontrées dans les dossiers que nous avons reçus pour le passage CRHC, fréquemment endossées par des femmes. La ventilation des chercheurs de la section 30 par thématique de recherche est présentée figure 5. La liste des thématiques est donnée en annexe 1. Les thématiques regroupant le plus de chercheurs sont « écologie fonctionnelle » (26 %) et « biogéochimie et physico-chimie des interfaces, cycle des éléments » (20 %). Les thématiques « processus de surface et de subsurface », « écotoxicologie/toxicologie environnementale et transferts de polluants » et « dynamique des écosystèmes [...] » représentent 14, 10 et 10 % des effectifs, respectivement. Les thématiques « paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires », « microbiologie environnementale » et « télédétection, analyse et imagerie de la surface et de la subsurface » représentent 8, 6 et 5 % des effectifs, respectivement.

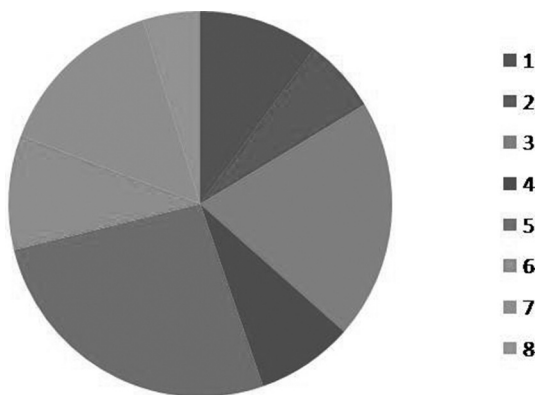


Figure 5 : Ventilation des chercheurs de la section 30 par thématique principale (pour l'explicitation des thématiques, voir annexe 1).

Parmi les profils chercheurs, 40 % ont été classés comme monothématiques (figure 6), c'est-à-dire que les deux mots-clés choisis par le rapporteur correspondaient à la même thématique (na : ce chiffre comme les autres concernant le paysage scientifique est donc à prendre avec précaution, car il existe potentiellement un biais méthodologique de non reproductibilité de l'analyse thématique des chercheurs d'un membre de la section à un autre, biais qui n'a pas été testé). Cette proportion de profils monothématiques est variable d'une thématique à l'autre comme le montre la figure 6. Elle est en moyenne de 46 % et évolue de 16 (T5, Écologie fonctionnelle) à 82 % (T4, Paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires). Globalement les thématiques T5 (écologie fonctionnelle) et T6 (dynamique des écosystèmes) sont celles au sein desquelles le plus de chercheurs présentent un profil inter-thématiques (figure 7), suivies d'un groupe formé par les thématiques T1-Ecotoxicologie, T2-Microbiologie et T3-Biogéochimie et physicochimie des interfaces pour lesquelles la proportion de chercheurs ayant un profil inter-thématique est de 57, 69 et 55 %, respectivement. Enfin 43, 30 et 18 % des chercheurs des thématiques T7-Processus de surface et de subsurface, T8-Télédétection, analyse et imagerie et T4-Paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires, respectivement, présentent un profil inter-thématiques.

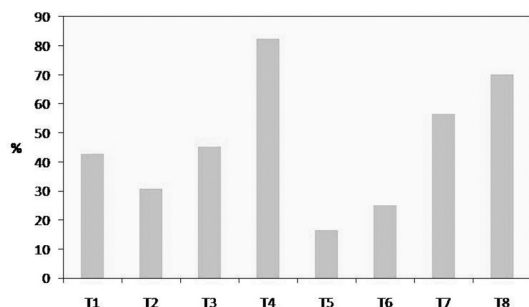


Figure 6 : Pourcentage de profils monothématiques en fonction de la thématique principale (pour l'explicitation des thématiques, voir annexe 1).

Les liens inter-thématiques ont été quantifiés et visualisés sous la forme d'un réseau présenté à la figure 7.

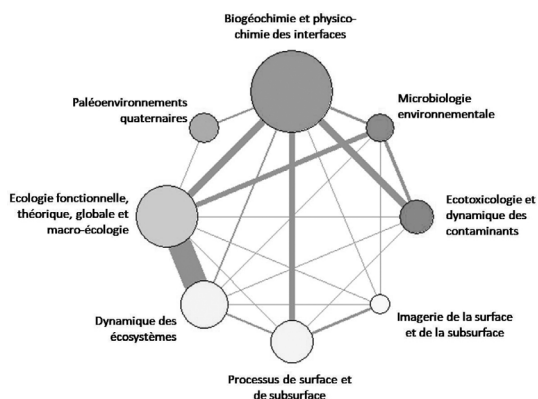


Figure 7 : Réseau formé par les profils inter-thématiques des chercheurs rattachés à la section 30. La taille des nœuds est proportionnelle à l'occurrence de chaque thématique (thématique principale et mots-clés) et l'épaisseur des liens est proportionnelle au nombre de profils situés à l'interface entre les thématiques considérées.

A. Analyse des liens inter-thématiques

La table 2 résume les liens exprimés en nombre entre les différentes thématiques. L'analyse des liens inter-thématiques au sein des profils des chercheurs rattachés à la section 30 fait res-

sortir comme liens principaux (> 10) par ordre décroissant d'importance T5-T6 (56 chercheurs), T1-T3 (19 chercheurs), T3-T5 (16 chercheurs), T3-T7 (14 chercheurs) et T2-T5 (12 chercheurs).

Table 2. Liens inter-thématiques exprimés en nombre de chercheurs.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1 Ecotoxicologie/toxicologie environnementale et transferts de polluants		9	19		1	1	1	
T2 Microbiologie environnementale	9		7		12	2		1
T3 Biogéochimie et physicochimie des interfaces, cycles des éléments	19	7		4	16	4	14	2
T4 Paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires			4		1			
T5 Écologie fonctionnelle	1	12	16	1		56	2	1
T6 Dynamique des écosystèmes continentaux (incluant les milieux urbains), estuariens, lagunaires, côtiers et marins	1	2	4		56		4	2
T7 Processus de surface et de subsurface	1		14		2	4		6
T8 Télédétection, analyse et imagerie de la surface et de la subsurface		1	2		1	2	6	

T1 (Ecotoxicologie/toxicologie environnementale et transferts de polluants):

Cette thématique est impliquée dans 19% des liens. Les liens se font avec les thématiques 2, 3, 5, 6 et 7. Les plus représentés sont avec les thématiques 2 (29% des liens; uniquement via le mot-clé «écologie microbienne») et 3 (61% des liens; le mot-clé «écodynamique des contaminants» interagit de manière similaire avec les mots-clés biogéochimie, physico-chimie et géochimie avec 4, 4 et 3 occurrences, respectivement; le mot-clé «écotoxicologie» ne présente pas de lien avec les mots-clés de la thématique 3).

T2 (Microbiologie environnementale):

Cette thématique est impliquée dans 19% des liens. Les liens se font avec les thématiques 1, 3, 5, 6 et 8. Les plus représentés sont avec les thématiques 5 (39% des liens; interaction entre les mots-clés «écologie microbienne» et «écologie fonctionnelle»), 1 (29% des liens; le mot-clé «écologie microbienne» interagit de manière similaire avec les mots-clés «écotoxicologie» et «écodynamique des contaminants» avec 7 et 5 occurrences, respectivement) et 3 (23% des liens; interaction entre les mots-clés «écologie microbienne» et «biogéochimie»).

T3 (Biogéochimie et physicochimie des interfaces, cycles des éléments):

Cette thématique est impliquée dans 40% des liens. Les liens se font avec les 7 autres thématiques de la section. Les liens les plus représentés sont avec les thématiques 1 (29% des liens; les mots-clés «biogéochimie», «physico-chimie» et «géochimie» interagissent de manière similaire avec le mot-clé «écodynamique des contaminants»), 5 (24% des liens; le mot-clé «biogéochimie» est le seul impliqué dans ce lien avec les mots-clés «écologie fonctionnelle» et «ingénierie écologique») et 7 (21% des liens; interaction des mots-clés «géochimie» et «biogéochimie» avec «hydrologie»).

T4 (Paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires):

Cette thématique est impliquée dans 3% des liens. Les liens se font avec les thématiques 3 (80% des liens; interaction entre «paléoenvironnements» et «géochimie») et 5 (20% des liens; interaction

«paleoécologie» avec «écologie fonctionnelle» et «ingénierie écologique»).

T5 (Écologie fonctionnelle): Cette thématique est impliquée dans 54% des liens. Les liens se font avec les 7 autres thématiques de la section. Les liens les plus représentés sont avec les thématiques 6 (63% des liens); le lien majoritaire est entre «écologie fonctionnelle» et «fonctionnement des écosystèmes» avec 8 occurrences, le lien entre «écologie théorique» et «fonctionnement des écosystèmes» présente 4 occurrences et le lien «écologie fonctionnelle» et «successions écologiques» présente 3 occurrences), 3 (18% des liens; les mots-clés «écologie fonctionnelle» et «ingénierie écologique» interagissent avec le mot-clé «biogéochimie») et 2 (13% des liens; lien unique entre «écologie fonctionnelle» et «écologie microbienne»).

T6 (Dynamique des écosystèmes continentaux (incluant les milieux urbains), estuariens, lagunaires, côtiers et marins):

Cette thématique est impliquée dans 42% des liens. Les liens se font avec les 7 autres thématiques de la section à l'exception de la T4. La très grande majorité des liens se font avec la T5 (81% des liens) notamment à travers le lien «écologie fonctionnelle» et «fonctionnement des écosystèmes».

T7 (Processus de surface et de subsurface):

Cette thématique est impliquée dans 16% des liens. Les liens se font avec les thématiques 1, 3, 5, 6 et 8. Les liens les plus représentés sont avec les thématiques 3 (52% des liens; principalement à travers le mot-clé «hydrologie» qui interagit avec «biogéochimie» et «géochimie»), 8 (22% des liens; la moitié des liens inter-mots-clés sont le fait du mot-clé «hydrologie» qui interagit avec les trois mots-clés de la T8) et 6 (15% des liens).

T8 (Télé-détection, analyse et imagerie de la surface et de la subsurface):

Cette thématique est impliquée dans 7% des liens. Les liens se font avec les thématiques 2, 3, 5, 6 et 7. Les liens les plus représentés sont avec les thématiques 7 (50% des liens; le mot-clé «télé-détection» interagit avec les trois mots-clés de la T7), 6 (17% des liens; lien entre «télé-détec-

tion » et « fonctionnement des écosystèmes ») et 3 (17 % des liens ; lien entre « analyse et imagerie de la surface et de la subsurface » avec « biogéochimie » et « physico-chimie »).

B. Répartition thématique des candidatures

1. Répartition thématique des candidatures et place de l'interdisciplinarité dans les thématiques

Sur les trois années de concours, le nombre de candidats dont la thématique a été jugée en lien avec la section 30 s'élève à 187 (les candidats ayant postulé plusieurs fois n'ont été comptabilisés qu'une fois). Sur ces 187 candidatures, les rapporteurs principaux ont défini une ou (le cas échéant dans le cas d'une interdisciplinarité) deux thématiques de section. Leur ventilation par thématique est donnée à la figure 8.

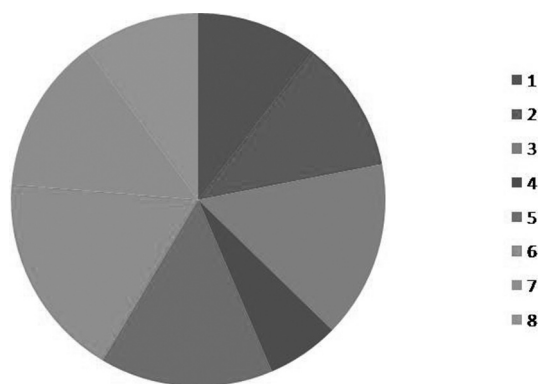


Figure 8 : ventilation des candidatures par thématique de recherche (pour la signification des n° des thèmes, voir annexe 1).

Parmi les 187 candidatures, 87 étaient monothématiques et 100 interdisciplinaires. La ventilation par thématique (en %) parmi les candidatures monothématiques et interdisciplinaires est donnée à la figure 9.

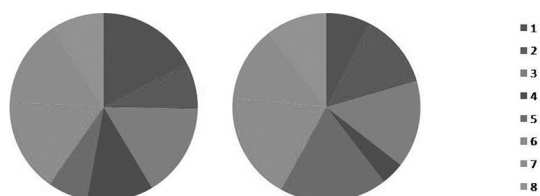


Figure 9 : ventilation des candidatures monothématiques (à gauche) et interdisciplinaires (à droite) par thématique (pour la signification des n° des thèmes, voir annexe 1).

Nous n'avons pas mesuré la progression du nombre de profils interdisciplinaires depuis le début de l'existence de cette section. Il conviendrait bien entendu de l'analyser, pour mesurer si l'interdisciplinarité autour des surfaces et interfaces continentales a progressé depuis la date de création de cette section.

La moyenne du ratio candidatures monothématiques/candidatures interdisciplinaires est de 0.6 ± 0.4 (moyenne \pm écart type) et se situe entre 0.2 (écologie) et 1.3 (paléoenvironnements).

Ecotoxicologie/toxicologie environnementale et transferts de polluants : Sur 30 candidatures affichant la thématique « Ecotoxicologie/toxicologie environnementale et transferts de polluants », 15 présentaient une composante interdisciplinaire. Parmi ces liens interdisciplinaires, 20 % avec la microbiologie (lien écotoxicologie – écologie microbienne), 59 % avec la chimie (lien majoritaire écodynamique des contaminants – physico-chimie), et enfin 7 % avec la dynamique des paysages, les processus de surface et l'imagerie de surface.

Microbiologie environnementale : Sur 33 candidatures, 26 présentaient une composante interdisciplinaire. Parmi les liens interdisciplinaires, 12 % le sont avec « Ecotoxicologie/toxicologie environnementale et transferts de polluants », 27 % avec la « Biogéochimie et physicochimie des interfaces, cycles des éléments » (lien unique entre les mots clé écologie microbienne et biogéochimie), 42 % avec l'écologie (lien majoritaire écologie microbienne – écologie fonctionnelle), 15 % avec la dynamique des écosystèmes (fonctionnement des écosystèmes), et 4 % avec les processus de surface (mot clé hydrologie).

Biogéochimie et physicochimie des interfaces, cycles des éléments : 30 candidatures sont interdisciplinaires sur 44. 30% le sont avec écodynamique des contaminants (lien fort entre écodynamique et physico-chimie), 23% avec la microbiologie (cf. paragraphe microbiologie), 7% avec paléoenvironnements, 20% avec la dynamique des écosystèmes (via le mot clé biogéochimie exclusivement), et 7% avec les mots clefs écologie, et processus de surface et imagerie de surface.

Paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires : 8 candidatures sont interdisciplinaires sur 18, 25% le sont avec la chimie (biogéochimie et géochimie-géochronologie), 13% avec la dynamique des écosystèmes (successions écologiques) et 63% avec les processus de surface (géomorphologie et hydrologie).

Écologie fonctionnelle : 37 candidatures sont interdisciplinaires sur 43. 30% de ces candidatures interdisciplinaires le sont avec la microbiologie (lien écologie microbienne-écologie fonctionnelle), 5% avec la chimie (1 seule candidature à l'interface entre écologie globale et biogéochimie), 51% avec la dynamique des écosystèmes, 11% avec les processus de surface (essentiellement avec la composante hydrologie) et 3% avec l'imagerie de surface.

Dynamique des écosystèmes continentaux (incluant les milieux urbains), estuaires, lagunaires, côtiers et marins : 37 candidatures sont interdisciplinaires sur 51. 3% de ces candidatures interdisciplinaires le sont avec «Eco-dynamique des contaminants», 11% avec «microbiologie», 16% avec «chimie», 3% avec «paléoenvironnements», 51% avec «écologie», 3% avec «processus de surface» et 14% avec «imagerie de surface»

Processus de surface et subsurface : 26 candidatures sont interdisciplinaires sur 39. 4% de ces candidatures interdisciplinaires le sont avec «Eco-dynamique des contaminants», avec «microbiologie», et avec «dynamique des écosystèmes», 8% le sont avec la chimie, 19% avec les paléoenvironnements (via les mots clé hydrologie et géomorphologie), 15% avec l'écologie, 46% avec l'imagerie de surface

(avec deux liens forts hydrologie-téledétection et hydrogéologie-géophysique).

Imagerie de surface et subsurface : 21 candidatures sont interdisciplinaires sur 29. 5% de ces candidatures interdisciplinaires le sont avec «Eco-dynamique des contaminants», et avec écologie, 10% le sont avec la chimie, 24% avec la dynamique des écosystèmes (télé-détection-fonctionnement des écosystèmes) et 57% avec les processus de surface (télé-détection-hydrologie et géophysique-hydrogéologie).

Une telle répartition des candidatures et des liens interdisciplinaires aboutit au réseau visualisé à la figure 10.

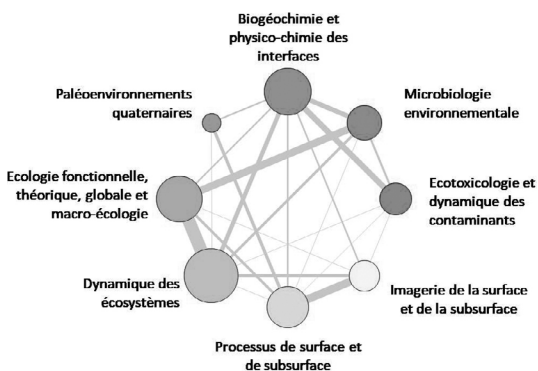


Figure 10 : Réseau formé par la ventilation des candidatures par thématiques et par les liens interdisciplinaires de 100 candidatures sur 180.

2. Caractéristiques des candidatures

Sur les trois dernières années, la section 30 a considéré 195 candidatures (les renouvellements de candidature comptent pour une) dont 111 ont été déposées par des hommes et 84 par des femmes, soit un rapport H/F de 1.3. Bien que l'âge ne soit pas un critère de sélection, cette donnée est précisée à titre indicatif. L'âge moyen des candidatures est de 35 ± 4 (écart type ; EC) ans, l'intervalle de confiance à 95% (IC) est de 1 an, et ces âges vont de 28 à 55 ans. Les candidatures se font après 6 ± 3 (moyenne \pm EC) années d'expérience postdoctorale avec des expériences qui varient

entre 0 et 17 années. Parmi ces expériences, les candidats ont passé 3 ± 3 (moyenne \pm EC) années à l'étranger avec là encore une large hétérogénéité puisque cette durée va de 0 à 12 années. La recherche menée par les candidats est valorisée par 18 ± 11 (moyenne \pm EC) articles scientifiques dont 8 ± 4 (moyenne \pm EC) en premier auteur. L'importance de l'écart type relatif indique une large dispersion de ces données bibliométriques avec un nombre d'articles qui varie de 0 à 62 et un nombre d'articles en premier auteur entre 0 et 23.

Sur les trois années de concours, la section 30 a recruté 17 CRCN (le concours était encore divisé en CR2 et CR1 en 2017 et a évolué en CRCN en 2018). Parmi les 17 recrutés, 11 étaient des hommes et 6 des femmes, induisant une augmentation du rapport H/F de 38%. La composition de la section étant paritaire, cette augmentation pourrait être due à un biais inconscient qu'il conviendra de surveiller lors des prochains concours, ou à des critères défavorisant les femmes qu'il faut rechercher. Pour le concours CR, les jeunes femmes peuvent être freinées dans leur progression scientifique par la maternité, qui intervient fréquemment après la thèse. Ceci conduit à un dossier qui aura tendance à être moins fourni, ou avec une moins grande mobilité, qu'un dossier masculin. Par ailleurs, on note dans les colloques une surreprésentation des hommes dans les comités scientifiques ou en tant que conférenciers invités. De même, on constate que les comités éditoriaux de revues sont très rarement paritaires. Ces éléments, qui contribuent à valoriser un candidat, sont donc majorés chez les hommes, et surestiment potentiellement la notoriété internationale des hommes comparativement aux femmes. Cette distorsion peut entraîner une meilleure considération des dossiers masculins en particulier pour les promotions DR. Pour le concours DR, un travail en amont est nécessaire pour que plus de femmes CR postulent DR. Du côté du jury, la section a convenu de veiller à ce que les candidats ne présentent non pas une longue liste de responsabilités valorisantes, mais plutôt une vision claire de leur vision de cette responsabilité, et de la manière dont ils l'assument. Cela veut dire aussi qu'il faut que les DAS et équipes de direc-

tion d'unités veillent à garantir la parité dans la prise de responsabilité à tous les niveaux hiérarchiques. Pour le jury, une solution possible serait aussi d'élargir notre vision de la responsabilité. Un responsable de collection, de culture d'algues, de développement de base de données, peut être aussi utile à la collectivité qu'un responsable d'équipe, et actuellement nettement moins bien considéré, donc rarement brigué par les hommes, plus en recherche de responsabilités auxquelles sont attachées un certain prestige. Pour simplifier à l'extrême (bien sûr, nous n'avons pas les éléments statistiques pour étayer notre perception), on note une tendance pour les hommes à s'impliquer dans des responsabilités favorables à leur carrière, et les femmes dans des responsabilités favorables au collectif, mais qui ne les propulsent pas forcément sur le devant de la scène. Si la section prend en compte la nature des responsabilités, ou cherche à établir des équivalences en termes d'investissement, elle devrait parvenir à diminuer les effets de ces distorsions sur les promotions.

L'âge moyen des CRCN recrutés est de 34 ± 3 ans et s'étale de 29 à 44 ans. Les candidats ont été recrutés en moyenne 7 ± 2 ans après leur thèse, et avaient passé 3 ± 2 années de post-doctorat à l'étranger. La réalisation d'un post-doctorat à l'étranger, bien qu'encouragée, n'est pas une obligation pour un recrutement CRCN. Ainsi, certains lauréats ont fait preuve d'une forte mobilité au cours de leur doctorat, ou de leurs études antérieures (étudiants étrangers venus faire leur thèse en France par exemple). Les recherches menées par les candidats recrutés étaient valorisées par 20 ± 10 articles scientifiques, cette valeur évoluant de 8 à 48, dont 9 ± 4 articles publiés en premier auteur, cette valeur évoluant de 5 à 21. Il n'y a pas de différence d'un point de vue bibliométrique entre le profil des candidats et le profil des candidats recrutés, le critère bibliométrique n'est pas utilisé par la section pour classer les candidatures non seulement du fait du caractère pluridisciplinaire de la section qui invaliderait un tel protocole, mais aussi car la section porte plus d'attention dans son recrutement à des critères qualitatifs (qualité originalité, maîtrise, et caractère interdisciplinaire du projet) qu'à des cri-

tères quantitatifs. Cette démarche n'est pas toujours bien comprise par les candidats qui pensent parfois que la quantité de publications est directement liée aux chances de recrutement. La section fait un effort pédagogique constant pour expliquer que chaque lauréat doit apporter une plus-value intellectuelle indéniable au CNRS. La section veille à l'autonomie scientifique des lauréats, et tous les candidats auditionnés (et donc à fortiori recrutés) doivent avoir publié au moins un article sans leur directeur de thèse et/ou leur équipe d'encadrement.

II. Problématiques scientifiques de la section

A. Ecotoxicologie/toxicologie environnementale

Mots clefs : écotoxicologie, écodynamique des contaminants

1. État de l'art, forces et avancées

Les écosystèmes sont soumis à diverses pressions anthropiques, dont la pression des contaminants chimiques, biologiques, ou inertes susceptible d'engendrer des perturbations de leur fonctionnement. La compréhension de la manière dont ces composés modifient le fonctionnement des écosystèmes à toutes les échelles de temps et d'espace, nécessite la prise en compte de l'éco-dynamique des contaminants, reposant en particulier sur l'étude de leurs sources, de leur devenir et des flux dans les écosystèmes. Elle nécessite également la prise en compte de la réponse des organismes macro- et microscopiques, des populations et des communautés, à ces contaminants. Les travaux en écotoxicologie concernant tout autant les écosystèmes terrestres et aquatiques, et s'in-

téressent aux différents compartiments constitutifs de ces écosystèmes, en particulier la colonne d'eau, les sédiments et les sols. Certaines études, moins nombreuses mais néanmoins très importantes, ciblent la dispersion de contaminants particulières aéroportées, la détermination de leurs sources (naturelle ou anthropogénique), la quantification des flux associés, leurs retombées et devenir dans la zone critique et leurs impacts en termes de santé publique.

Les contaminants « historiques », tels que les métaux, pesticides, hydrocarbures sont toujours bien représentés mais on peut relever le fort intérêt suscité par les polluants dits « d'intérêt émergent » comme les plastiques (micro-nano) ou les perturbateurs endocriniens et résidus pharmaceutiques, qui représentent environ 50% des travaux présentés dans ce domaine. On note, bien que toujours d'actualité, un déclin du nombre de projets portant sur les nanoparticules (< 10%). En ce qui concerne les pathogènes, les organismes pathogènes sont naturellement présents dans les milieux naturels (e.g. onchocercose, transmise par les simules ; maladie de Lyme, transmise par les tiques ; échinococcose alvéolaire, transmise essentiellement par les rongeurs et les canidés ; ZIKA, Chikungunya, paludisme, impliquant différentes espèces de moustiques) et leur prévalence a par conséquent une très forte composante écologique, qui implique de se pencher sur le fonctionnement des écosystèmes qui les abritent, les facteurs favorisant, ou favorisant leur survie, leur multiplication, leur transmission. De surcroît, à cela s'ajoutent les micro-organismes modifiés par les activités humaines (e.g. bactéries antibio-résistantes dont l'antibio-résistance est renforcée par la présence de métaux lourds, champignons développant des résistances aux fongicides, etc.). Ces questions ont été peu considérées par la section. Pourtant, la composante écosystémique de l'existence et du maintien de ces organismes pathogènes, de l'acquisition éventuelle de pathogénicité, de la transmission à l'homme ou aux animaux d'élevage, n'est pas réellement considérée dans les autres sections avec un regard d'écologie, ce qui nuit sans doute à l'efficacité des recherches menées.

Le contexte de multi-stress est bien pris en compte, généralement dans un contexte de cocktails de contaminants chimiques. La plupart des travaux traitent des effets des contaminants, seuls ou en mélange, dans un contexte de changement global, en considérant le plus souvent la hausse de température. Les situations de multi-stress et multi-contaminations sont abordées à diverses échelles permettant d'appréhender des situations réalistes avec des mesures de terrain mais aussi de proposer des approches plus mécanistiques à partir d'expérimentations en méso- et microcosmes. La prise en compte de contaminations aiguës et chroniques et de faibles doses, plus proches de situations environnementales, est désormais courante.

Les effets des contaminants sur les organismes sont, dans la plupart des cas, étudiés via une démarche expérimentale assez classique d'écotoxicologie basée sur l'utilisation de marqueurs à différents niveaux d'organisation biologique, des niveaux tissulaire, cellulaire et moléculaire à l'organisme dans son ensemble, et cette pratique bénéficie largement des avancées méthodologiques permettant d'apprécier l'expression de gènes au travers d'outils de transcriptomique, protéomique et de métabolomique. Les approches dose-effets *in vitro* sont encore largement représentées avec néanmoins un effort pour intégrer de nouvelles dimensions dans ces travaux avec la prise en compte de pressions multiples et le développement de cadre interprétatif combinant des données acquises à différents niveaux d'organisations plus complexes, populations ou communautés. La démarche Adverse Outcome Pathway (AOP) est beaucoup utilisée comme cadre conceptuel pour synthétiser les informations acquises à différents niveaux d'organisation biologique. Cependant, l'intégration dans cette démarche des mécanismes biogéochimiques et bio-physico-chimiques gouvernant la spéciation, la biodisponibilité (voir la bio accessibilité) des contaminants dans les exposomes demeure encore marginale ou effectuée de manière empirique par l'utilisation de modèles restrictifs (BLM, FIAM, WHAM, NICAD, etc.) basés sur des hypothèses simplifiées et/ou faisant inter-

venir des jeux de paramètres *ad hoc* dont les significations physique et/ou biologique sont parfois peu évidentes. Ces modèles reflètent mal la complexité des processus mis en jeu, par exemple les transferts réactifs multi-échelles extra- et intra-organisme des contaminants, leurs déterminants thermodynamiques et cinétiques, ainsi que l'impact des boucles de rétroactions biologiques sur le triptyque spéciation-biodisponibilité-toxicité. La prise en compte de ces différents facteurs et la combinaison avec des expérimentations destinées à estimer la compartimentation spatiale et temporelle des différentes formes d'un contaminant donné dans les organismes cibles, sont clairement à encourager pour améliorer (i) la compréhension des effets *via* une évaluation de leurs origines moléculaires, et (ii) l'établissement des couplages, complexes, équilibres et hors-équilibres, entre processus biologiques et processus géochimiques-physicochimiques qui contrôlent l'éco-dynamique des contaminants dans les milieux d'exposition.

La structuration de la communauté scientifique des écotoxicologues microbiens au niveau national a sans nul doute stimulé les travaux qui se revendiquent de l'écotoxicologie microbienne, discipline qui apparaît à partir de 2014 en tant que mot clé dans les publications et qui est en continue progression. La communauté scientifique française y est bien représentée mais le vivier potentiel de recrutement est encore peu visible. Ces travaux intègrent le rôle des microorganismes dans les processus de transformation et l'impact des polluants sur les communautés et le fonctionnement des écosystèmes. En ce qui concerne les micro-organismes pathogènes, la recherche dans la section en est à ses balbutiements, l'écologie de la santé étant généralement abordée dans un contexte plus sanitaire (INSB) ou évolutif (section 29) et rarement dans un contexte d'écologie de de fonctionnement des écosystèmes. C'est probablement un fort challenge dont doit se saisir la communauté, car la connaissance de la niche environnementale des pathogènes, et les déterminismes de leur succès et du développement de leur pathogénicité dans l'environnement, est probablement un enjeu très fort et amené à

prendre une importance considérable dans les prochaines années. Ainsi, dans « One Health », la composante de santé des écosystèmes, qu'on relie de plus en plus à la santé des organismes et à la santé humaine, reste à appréhender, et les membres de la section sont très bien placés pour réussir ce pari.

2. Faiblesses, Enjeux et verrous

Malgré les évolutions positives observées, les études écotoxicologiques nécessitent de poursuivre les efforts engagés afin de mieux appréhender le lien entre écotoxicologie et fonctionnement des écosystèmes. Un des enjeux de l'écotoxicologie est en effet d'évoluer vers une approche écosystémique multi-échelle. En ce sens, un couplage entre écotoxicologie et écologie du stress doit être encouragé, ou tout simplement un rapprochement des communautés d'écotoxicologues des communautés d'écologues fonctionnels. Transcender les études modèle-centrées pour les ouvrir à des niveaux d'organisation supérieurs (population, communauté, écosystème) et d'échelle spatiale (études *in vitro*, en microcosmes ou mésocosmes et sur le terrain) est certainement un enjeu fort, que l'on voit encore peu dans les dossiers présentés. Cela pourrait être un artefact lié à la nature des candidatures analysées : un jeune chercheur ne peut pas, dans sa courte carrière, appréhender ces différentes échelles, et se focalise souvent sur les échelles les plus mécanistiques, expérimentales, plus rapidement valorisables scientifiquement, que des échelles écosystémiques, dans lesquels la décomposition des facteurs de contrôle est plus ardue et réclame des protocoles de mesure très ambitieux. Le challenge repose alors sur la capacité de la section à déceler dans les candidats ceux qui présentent réellement ce potentiel, ce qui n'est pas chose aisée.

Dans un contexte d'urbanisation croissante, les problématiques d'écotoxicologie urbaine et péri-urbaine (gestion de l'eau pluviale, sols remaniés et pollués, friches industrielles, espèces envahissantes) constituent également

des perspectives à dynamiser, sans buter sur l'écueil d'une approche d'ingénierie, mais en développant des problématiques scientifiques innovantes. Le concept récent d'écotoxicologie du paysage, qui consiste à relier l'hétérogénéité fonctionnelle des paysages aux différents paramètres de toxicologiques, permet d'aborder la question de la réponse des populations, des communautés et des écosystèmes aux polluants, mais reste encore trop peu développée dans la communauté.

B. Microbiologie environnementale

Mots clés : écologie microbienne, communication chimique

1. État de l'art, forces et avancées

Les microorganismes ont un rôle fondamental dans les différents cycles biogéochimiques, et sont à la base du fonctionnement des écosystèmes. Leur prise en compte s'inscrit dans le concept « One Health » et ils sont au cœur de préoccupations de santé publique telles que l'antibiorésistance ou les risques sanitaires.

La microbiologie environnementale telle que déclinée dans la section concerne donc l'ensemble des compartiments environnementaux des SIC, qu'il s'agisse du sol, des environnements aquatiques marins et d'eau douce, des zones estuariennes, costales et lagunaires mais également la prise en compte plus récente de l'atmosphère. Par exemple, des travaux sur le microbiote des nuages émergent avec l'analyse de la diversité des communautés microbiennes présentes dans les nuages, leur fonctionnement et les conséquences sur le milieu comme par exemple leur implication dans les bio précipitations. L'écologie microbienne est abordée dans la section sous l'angle de la compréhension des mécanismes moléculaires et écologiques qui influencent leur survie et leur

diversité, leur dissémination, leurs rôles dans les interactions biotiques et les dynamiques de communautés, ainsi que leurs rôles dans le fonctionnement des écosystèmes. Les travaux s'appuient largement sur les avancées techniques des dernières décennies notamment l'utilisation des « omics » pour tenter de mieux appréhender la diversité, la structure des communautés et leur fonctionnement à tous les niveaux du continuum biomoléculaire.

On peut ainsi noter l'apparition encore timide de la caractérisation des médiations microbiennes notamment en lien avec l'étude transcriptomique de la régulation des clusters de gènes de biosynthèses comme facteur régissant la structuration des communautés. A ce jour, ces approches restent encore très ciblées en se concentrant sur des composés toxiques phare connus produits par des cyanobactéries ou des dinoflagellés.

Le concept d'holobionte a émergé ces dernières années repensant ainsi la notion d'individu comme un superorganisme incluant l'hôte et son microbiote occasionnant l'étude de la diversité microbienne de nombreux macro-organismes tant en milieu terrestre que aquatiques (plantes, coraux, poissons, crustacés.). Ce concept conduit cependant pour l'instant à de nombreuses approches de descriptions de la diversité du microbiote des organismes vivants, étape indispensable avant l'analyse plus fonctionnelle de ses déterminismes et de son rôle.

Le décryptage de la relation diversité microbienne-fonction contribue à l'amélioration de la compréhension du fonctionnement des écosystèmes. Ceci fait l'objet de travaux qui intègrent différentes échelles temporelles et spatiales -des microcosmes aux sites instrumentés des ZA et SNO- permettant apprécier le rôle de la composition de ces communautés sur les capacités de résistance et de résilience des écosystèmes. L'utilisation des traits d'effets et de réponses pour évaluer la réponse des systèmes aux forçages, jusqu'alors plutôt représentée dans les études portant sur des macro-organismes, fait désormais partie de la boîte à outils des microbiologistes et écologues microbiens.

2. Faiblesses, Enjeux et verrous

On constate globalement que dans les nombreuses études sur le fonctionnement des écosystèmes et leurs réponses aux changements globaux ou autre forçage, l'importance de la composante microbienne est encore négligée et que leur rôle n'est pas explicité. La composante microbienne et son fonctionnement n'est en effet très peu voire pas pris en compte dans les modèles développés. A contrario, les études d'écologie microbienne se concentrent surtout sur l'unique compartiment bactérien négligeant encore souvent eucaryotes, archées et virus, même si les études reliant les fonctions bactériennes et les végétaux sont nombreuses.

En dehors de la notion de risque sanitaire évoquée dans le cadre du concept « one health », la place des pathogènes et de la pollution biologique n'est encore que peu abordée. Ainsi, l'étude de l'impact des pathogènes (i) sur la diversité et le fonctionnement des écosystèmes et (ii) sur les risques pour la santé humaine et animale est encore anecdotique. A ce jour peu de travaux portent par exemple sur les effluents des hôpitaux et leurs impacts sur la résistance aux antibiotiques ou encore sur des notions nouvelles comme celle du « plasmidome ».

Par ailleurs si l'écologie microbienne a pu bénéficier de nouveaux concepts tels que celui de l'holobionte et d'outils « omics » de plus en plus performants, l'annotation et la mise en relation de l'ensemble des données générées restent encore très parcellaires, limitant ainsi l'accès à une compréhension globale et répondant difficilement à l'élucidation des mécanismes impliqués et à leur impact tant sur le fonctionnement du microbiote que sur de l'hôte. Ces approches restent par ailleurs encore très compartimentées, intégrant au mieux quelques partenaires microbiens de l'holobionte, et font encore abstraction des vastes réseaux au sein desquels les microorganismes sont impliqués.

Il convient de favoriser l'intégration d'une dimension services (ou dys-services) écosystémiques aux travaux visant à expliciter les relations diversité microbienne-fonction ce qui

suppose d'intégrer des niveaux d'organisation biologique et des échelles de temps très différents (avec des temps de réponse très courts pour les microorganismes et longs pour les écosystèmes) et nécessite de favoriser les approches top-down (du terrain au laboratoire) pour appréhender le fonctionnement des écosystèmes.

C. Biogéochimie et physicochimie des interfaces, cycles des éléments

Mots clés : biogéochimie, physico-chimie, géochimie, altération, écodynamique des contaminants

Une forte lisibilité des chercheurs du domaine SIC apparaît dans les domaines suivants : **1.** le traçage des sources et processus contrôlant les transferts de contaminants et nutriments dans les écosystèmes continentaux par des méthodes isotopiques de pointe (*e.g.* utilisation d'isotopes non traditionnels), **2.** L'utilisation des techniques synchrotron en sciences de l'environnement, notamment pour la spéciation des contaminants et la compréhension de leur dynamique aux interfaces minérales et biologiques (nano-contaminants, métaux et métalloïdes, toxicité, mobilité) et **3.** L'analyse du fonctionnement biogéochimique de la zone critique et des environnements côtiers, polaires et boréaux.

Les chercheurs CNRS rattachés à la section 30 maintiennent une activité très visible au niveau international dans les domaines relatifs à la géochimie des sols, des eaux de surface et souterraines, des environnements urbains, industriels et miniers, et à la physicochimie des interfaces minérales et organiques. L'activité scientifique dans les domaines d'intérêt émergents tel que l'écodynamique des nanoparticules manufacturées, des micro/nanoplastiques, des contaminants métalliques et des radioéléments, la dynamique de la matière organique et colloïdale des sols et le suivi des

pollutions aquatiques et atmosphériques (métaux, gaz à effet de serre en particulier), se positionnent bien au niveau international ainsi que les aspects relatifs à la modélisation numérique et analytique des processus clefs sous-jacents à ces problématiques importantes de la section 30.

Les domaines en très forte émergence tels que l'écodynamique de micropolluants organiques d'intérêt (*e.g.* les composés pharmaceutiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.) font l'objet d'études de plus en plus nombreuses. Les activités de recherche portent sur l'élaboration de solutions pour la (bio)remédiation des sols contaminés par des contaminants (nano)métalliques et organiques, sur le recyclage des déchets et la fabrication de bioénergie, sur l'analyse des processus biogéochimiques contrôlant de devenir des nutriments dans les eaux et sols. Il existe par ailleurs un enjeu important à mieux comprendre le rôle des bio-interfaces et de leurs déterminants physico-chimiques dans les processus de bio-partition de contaminants métalliques, organiques et des traceurs isotopiques. Peu d'études encore, malgré l'importance de ces processus, portent sur la maîtrise des flux de nutriments et de pesticides dans les agrosystèmes, la préservation des sols comme ressources chimiques et biologiques, et l'évaluation des impacts des activités anthropiques sur le fonctionnement biogéochimique du continuum terre-mer, y compris au niveau des zones de transition estuarienne.

La dynamique et la visibilité très forte des recherches menées au sein de la communauté sur l'écotoxicité des nano-contaminants, encourage à renforcer les ponts entre géochimie/physico-chimie des interfaces, écodynamique des contaminants et écotoxicologie. Ceci implique par exemple d'identifier les processus à l'équilibre et hors-équilibre, biotiques et abiotiques, contrôlant l'évolution des contaminants (processus redox, mécanismes de complexation, dissolution, agrégation, précipitation, dégradation), leurs transferts réactifs vers/depuis les organismes ou bio-indicateurs, leur biodisponibilité et bioaccessibilité. A cet égard, des efforts importants portent sur la

métrologie des systèmes complexes impliquant les exposomes (pH, salinité, température, teneur en matière organique, potentiel redox) et des phases colloïdales naturelles ou xénobiotiques (composition chimique, taille, morphométrie, charge, degré de dispersion-agrégation et sédimentation, réactivité chimique), ce afin d'établir des liens mécanistiques entre distribution spatio-temporelle des contaminants, réactivité physico-chimique des interfaces, réponses biologiques spécifiques et homéostatiques.

Les activités des chercheurs de la section 30 portant sur la compréhension du devenir de contaminants nano-particulaires, métalliques, ou metalloïdes dans les milieux aquatiques, la rhizosphère et les sites pollués illustrent le bénéfice d'allier les outils de la géochimie (minéralogie, isotopie), de la physicochimie (mécanismes de dispersion colloïdale), de la microbiologie (inventaire phylogénique) et de l'écotoxicologie (outils "omiques"). La section est également bien présente sur la compréhension de la structure et de la réactivité de phases minérales aux échelles moléculaires, nano- et micrométriques par l'utilisation des approches spectroscopiques, microscopiques et numériques (dynamique moléculaire, champ moyen). Différentes résolutions spatiales et temporelles permettront de progresser sur des thématiques bien représentées dans la section 30, telles que le vieillissement et l'altération aux interfaces fluide-roche, la stabilité des complexes organo-minéraux, les écoulements multiphasiques en milieu poreux hétérogènes, le transport colloïdal et réactif.

Les recherches ayant pour but d'établir – sur une base mécanistique – les liens entre écodynamique de contaminants examinés par modélisations/expérimentations aux petites échelles et modélisations/expérimentations aux macro-échelles (bassin versant, parcelle agricole, continuum terre-mer, systèmes hydrologiques) restent encore peu développées dans la communauté. Cette jonction des échelles pourrait passer par un dialogue interdisciplinaire accru entre les chercheurs de la section 30 actifs dans les domaines de la microbiologie environnementale, de l'écologie, de la biogéochimie, de

la physicochimie des interfaces et des bio-interfaces et de l'écotoxicologie, avec les chercheurs statisticiens spécialisés dans l'analyse et la structuration de larges jeux de données hétérogènes et multi-échelles.

Les activités des chercheurs de la section 30 portant sur les matières organiques (MO) se retrouvent principalement dans quatre thématiques : biogéochimie, écotoxicologie, microbiologie environnementale et écologie fonctionnelle. Les recherches en biogéochimie des MO naturelles, intégrant le changement de paradigme sur la stabilisation des MO, visent à une compréhension mécanistique des processus de stabilisation et déstabilisation des MO dans les sols, tourbières et aux interfaces sol-rivière. Ces approches sont souvent menées dans un contexte de changement global et nourrissent des modèles de dynamique du C dans les sols allant de l'échelle du μm^3 au globe. Les recherches sur les interactions organo-minérales, incluant nanoparticules naturelles et anthropiques, les métaux et les metalloïdes, permettent d'améliorer notre compréhension des architectures supramoléculaires contrôlant aussi bien la spéciation et la mobilité des métaux et metalloïdes que la biogéochimie des nutriments et des MO.

Les recherches portant sur l'écodynamique des contaminations organiques se focalisent soit sur les micropolluants, incluant des micropolluants historiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques et le développement sur des polluants émergents et micro- nano-plastiques, soit en développant des approches type traçage de sources *via* des biomarqueurs moléculaires. Les travaux en lien avec la microbiologie environnementale étudient la MO comme base de la biodiversité. Ils portent notamment sur l'utilisation de la MO comme ressource dans les réseaux trophiques et sur l'impact des microhabitats sur les communautés microbiennes. Les travaux en lien avec l'écologie fonctionnelle étudient la MO comme source de matière et d'énergie et portent également sur la décomposition de la MO en fonction de sa composition et sur les flux d'éléments dans et entre les écosystèmes. Ces travaux se font selon différentes

approches : observation, expérimentation et/ou modélisation. Ils mobilisent une diversité d'outils analytiques allant de l'analyse élémentaire à l'analyse isotopique sur composés spécifiques. La communauté mobilise les infrastructures de recherche nationales (IR OZCAR et RZA) et gagnerait à développer les liens entre les différentes approches et thématiques *via* les réseaux type CarboSMS et ResMO et les GDR pour un enrichissement mutuel.

D. Paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires

Mots clés : chronoécologie, géochronologie, paléo-environnements, paléoécologie

La thématique est par essence destinée à interagir avec plusieurs sections du CNRS, ce qui rend le positionnement thématique des acteurs toujours un peu délicat. Ainsi, la thématique trouve des interfaces évidentes avec la section 19 du CNRS «Système Terre : enveloppes superficielles», notamment pour la partie «paléo-environnements : archives océaniques, glaciaires et continentales». Toutefois, les questions paléoécologiques sont davantage abordées par le biais des dynamiques des écosystèmes marins dans la section 19 et par le biais des écosystèmes terrestres dans la section 30, avec des développements de bio-indicateurs fossiles et de biomarqueurs appliqués aux archives sédimentaires continentales à côtières. Pour des questions relevant des thématiques croisées «paléoécologie / paléo-environnement» et «anthropisation des écosystèmes», les chercheurs CNRS se trouvent partagés entre la section 30 et la section 31. Cependant, la section 31 est focalisée sur les dynamiques d'occupation humaine et la section 30 aborde davantage les questions d'ordre environnemental telles que l'évaluation de l'impact des hommes sur les paléopaysages, la géomorphologie, l'accès aux ressources et leurs exploitations (biologiques ou minières). Enfin, parmi les paléoécologues, une division

est aussi observée entre les paléontologues de la section 18 travaillant aux échelles de temps géologiques, amenant à des problématiques de paléobiosphère, paléogéographie et évolution des grands biomes, tandis que la section 30 focalise sur les échelles de temps quaternaires avec un focus plus spécifique sur l'Holocène, et donc aussi la chronologie des archives sédimentaires, les dynamiques de paléo-biodiversité, les quantifications climatiques sur les derniers milliers d'années, les modes de variabilité climatique naturelle, le tout dans un contexte de forçages climatiques et anthropiques croissant sur les derniers milliers d'années. Lorsque l'on s'intéresse au positionnement de la recherche dans ce champ sur la scène internationale, les chercheurs du CNRS sont systématiquement en 1^{re} ou 2^e place des institutions qui publient à l'échelon international dans cette thématique, avec une représentation moyenne systématique de 4 à 6% du CNRS parmi l'ensemble des publications existantes. Les chercheurs de la section 30 sont à la première place des publiants à l'échelle internationale dans les thématiques où apparaissent les mots-clés suivants : «*climate reconstructions, paleoenvironment, palynology and Holocene*».

Les secteurs géographiques étudiés couvrent l'ensemble des biomes terrestres des environnements polaires jusqu'aux latitudes équatoriales. On note des chantiers privilégiés toutefois dans des hotspots de biodiversité tels que le bassin méditerranéen, les environnements tropicaux et subtropicaux mais aussi les zones prairiales en secteur boréal.

En termes d'outils, les reconstructions polliniques adossées aux quantifications climatiques dérivées des études palynologiques sont particulièrement bien représentées dans la section 30, de même que le corpus de bio-indicateurs continentaux ((micro)charbons, phytolithes, insectes). Les flux de nutriments liés à l'agro-pastoralisme, à l'agriculture intensive des dernières décennies, aux feux de forêts, à l'érosion des sols et à la dépendance vis-à-vis de la géologie des bassins versants, sont considérés dans les travaux des chercheurs étudiant les derniers milliers d'années.

Ainsi, une thématique émergente relève des paléo-dynamiques trophiques à partir des bio-indicateurs fossiles, croisés aux proxys géochimiques (essentiellement les isotopes stables). Enfin, les outils géochimiques (traçeurs de sources, datations, taux d'érosion, flux de paléo-poussières pour reconstruire la circulation atmosphérique/le régime paléotempétueux) et minéralogiques font également partie du panel pluri-indicateurs des outils déployés par les chercheurs de la section 30. Les reconstructions paléoenvironnementales exigent donc des compétences pluri-disciplinaires en (paléo)écologie et géochimie sédimentaire, avec la calibration préalable des outils en question, ainsi qu'en sédimentologie, géologie et géochronologie dans la mesure où ces études rétrospectives exigent des chronologies robustes faites sur des archives sédimentaires dont les sites carottés requièrent au préalable d'avoir connaissance de l'architecture des dépôts (géophysique, dynamique sédimentaire) dans le bassin étudié.

1. Bilan

La résilience des écosystèmes en contexte de variabilité climatique couplée à l'impact croissant de l'anthropisation des bassins versants est un enjeu fort des études paléoenvironnementales menées par les chercheurs de la section 30 exigeant une interdisciplinarité forte, afin de décrypter les trajectoires écologiques passées et de mieux comprendre les enjeux socio-écosystémiques soulevés par les trajectoires futures potentielles des écosystèmes continentaux et/ou côtiers. Ce point fort de la section 30 est aussi une réelle visibilité internationale de la communauté française qui place le CNRS au 1^{er} ou 2^e rang des publiants sur ces thématiques.

La thématique est très interdisciplinaire dans les outils de description des environnements passés, en particulier sur les outils géochimiques, mais peine à effectuer des rapprochements avec l'écologie fonctionnelle. Pourtant, la description des peuplements passés, ou des composantes géochimiques

passées des sols, est potentiellement très éclairante sur les pratiques et leurs conséquences en termes de fonctionnement des écosystèmes.

Les approches « bio-indicateurs » sont souvent descriptives, et peu quantifiées. De même, il serait nécessaire de renforcer le volet statistique de ces études, afin de pouvoir relier de manière robuste des chroniques temporelles obtenues à partir de différents outils, ainsi que de développer les approches couplant les données micro-fossiles avec des modèles de biodiversité ou de fonctionnement des écosystèmes afin d'évaluer les processus contraignant la réponse des espèces et communauté au cours du temps.

La discipline doit arriver à dépasser les « études de cas » pour construire une science plus fonctionnelle, et aboutir à des principes et processus fondateurs qui la rapproche des autres disciplines de la section, ou se rapprocher de ces autres disciplines, pour faire émerger ces principes.

Certaines approches novatrices voient le jour, qui visent à utiliser des proxys originaux pour décrire des processus complexes, ou visant à relier écologie théoriques et approches paléoenvironnementales, mais elles restent rares.

E. Fonctionnement écologique

Mots clefs ; écologie fonctionnelle, ingénierie écologique, dynamique des écosystèmes, écologie théorique, macro-écologie, écologie globale

1. Etat de l'art, forces et avancées

Face à l'érosion de la biodiversité, et ses conséquences sur les fonctions et services associés, l'étude du fonctionnement écologique (Figure 11) est aujourd'hui au cœur des problématiques prioritaires pour comprendre la réponse du vivant aux changements globaux. Seule une meilleure connaissance du

fonctionnement des écosystèmes permettra de savoir comment réagir face aux changements en cours. Pour cela, la compréhension des processus qui gouvernent la réaction de toutes les échelles du vivant aux variations environnementales, en prenant en compte la complexité à chaque niveau d'organisation et les interactions entre ces niveaux est indispensable au développement d'une écologie prédictive, faisant le lien entre écologie théorique et écologie appliquée à la gestion.

Comme le montre l'analyse des thématiques scientifiques faite plus haut, la notion de fonctionnement écologique est transverse à différentes échelles et concerne un grand nombre de chercheurs et de candidats. Nous aurions pu séparer ce groupe en niveaux d'organisation de l'individu dans son environnement à l'écosystème et à la biosphère dans son ensemble. Cependant, nous n'avons pas souhaité couper ce grand thème en sous parties du fait de la continuité des échelles et de l'intérêt pour les chercheurs de cette communauté de partager des méthodes et des outils communs.

L'analyse bibliographique fait ressortir tout d'abord que le CNRS est très bien placé (rang de 1 à 3) dans quasiment toutes les associations testées en lien avec le fonctionnement et l'écologie. On peut mettre en avant quelques domaines où le CNRS est premier ou second dans le classement des structures de recherche. Ces domaines de force se situent à tous les niveaux d'organisation de l'étude des traits fonctionnels individuels, aux réseaux trophiques ou encore à la macroécologie. De plus, le rayonnement est spécialement fort sur certaines méthodes et en particulier l'intelligence artificielle.

La force de la recherche sur le fonctionnement écologique est située à l'interface avec d'autres thématiques de la section 30, par exemple la biogéochimie. Elle est aussi située sur les interfaces avec des thématiques de la section 29, en particulier sur le lien fonctionnement – biodiversité, évolution, biogéographie, ou encore phylogéographie. Cela souligne que l'interface des sections 29 et 30 est d'une grande richesse.

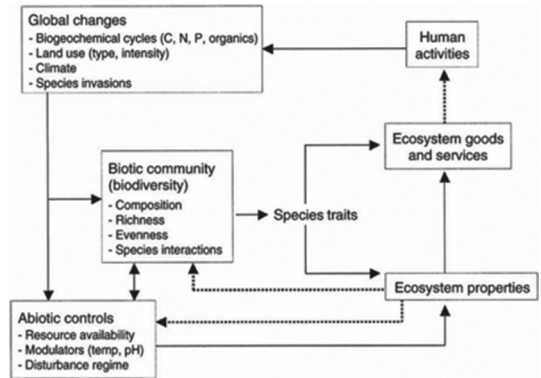


Figure 11 : L'étude du fonctionnement écologique se focalise sur les effets de la variabilité environnementale sur la structure et la dynamique des écosystèmes, en incluant les flux de matière et d'énergie et les cycles bio-géo-chimiques. Les caractéristiques fonctionnelles des organismes vivants, et la dynamique de leurs peuplements sont mesurés à différentes échelles d'observation biologique (des molécules en passant par les organismes jusqu'aux écosystèmes et à la biosphère). L'objectif est de prédire la réponse de la biodiversité et des caractéristiques fonctionnelles des communautés et des écosystèmes selon différents scénarios de changements environnementaux, qu'ils soient locaux ou globaux, et sur des échelles de temps de la seconde à plusieurs centaines d'années. L'écologie fonctionnelle évalue notamment l'importance des différentes facettes de la biodiversité dans la régulation et la stabilité des processus écosystémiques, des flux de matière et d'énergie, et des rétroactions sur l'environnement et le climat (modifié de rapport conjoncture 2014, Figure de Hooper *et al.* 2016).

Le lien écologie fonctionnelle - intelligence artificielle apparaît comme un domaine émergent, encore représenté par un nombre limité de publications, mais le CNRS y tient la première place. Ce faible nombre de publications se retrouve sur les méta-écosystèmes mais là aussi, le CNRS représente une part importante des publications et une première place.

Un consensus se dégage autour de l'idée que la dimension fonctionnelle de la diversité est primordiale à considérer pour comprendre et prédire les réponses des écosystèmes et de leurs composantes aux changements planétaires en cours. Elle permet de définir les indicateurs fonctionnels clés de la résistance et de la résilience des écosystèmes, connaissances indispensables pour la gestion adaptative des écosystèmes et des services et leur éventuelle

restauration. La recherche des chercheurs relevant de la section 30 est très présente sur la scène internationale. Les mots clefs du champ disciplinaire peuvent se placer aux 4 échelles principales que sont : 1. individus, 2. communauté et écosystème, 3. paysages, méta-écosystèmes et 4. biomes, échelle planétaire. Les recherches menées dans la communauté SIC sont soit inscrites dans le périmètre de la section, soit aux interfaces avec d'autres sections comme les sections 29, 31, 39, ou encore 52.

La section est particulièrement à la pointe sur le volet de la modélisation, renforcée grâce à des liens forts avec les données de terrain et les données expérimentales. Dans ce cadre, le CNRS a contribué à renforcer la création de grands instruments dédiés à l'étude des processus écologiques. L'enjeu pour la section est donc de maintenir cet équilibre entre modélisation, expérimentations *in* et *ex situ*, et approches corrélatives de terrain, car c'est la complémentarité entre ces approches qui constitue le nœud du potentiel d'innovation en écologie fonctionnelle.

2. Faiblesses, enjeux

Parmi les faiblesses peut être souligné le manque d'articulation entre écologie fonctionnelle et processus biogéochimiques, qui peut être dû en partie à la rupture entre les échelles d'analyse de ces deux disciplines (l'approche écologique étant peu compatible avec des approches basées sur des mécanismes physico-chimiques se réalisant souvent à une échelle moléculaire, du pore ou de l'agrégat). De même, les approches multi-échelles même au sein de la discipline, mériteraient d'être renforcées, mais nécessitent souvent une maturité scientifique s'inscrivant dans le temps long, et en général peu présente chez les jeunes chercheurs. L'analyse de combinaisons de forçages variés (locaux vs globaux), et l'étude du cumul d'impacts sur les fonctions, commence à apparaître dans la communauté, mais reste encore peu présente.

La section est confrontée à un renouvellement de génération, avec une montée en force

de la modélisation et de l'analyse de données large échelle dans les plus jeunes générations, tandis que la démarche taxonomique et empirique, est plutôt portée par des chercheurs plus âgés. Malgré la grande richesse de ces approches globales, il est important de veiller au maintien des approches de terrain, d'écologie des communautés, à bien conserver la connaissance fine des taxons et des écosystèmes dans toute leur variété. Les candidatures actuelles, en mettant fortement l'accent sur les approches globales, ou à fine échelle les approches moléculaires et les traits fonctionnels peuvent conduire à un affaiblissement (déjà sensible) de la section dans ces échelles intermédiaires.

Une grande part de la collecte de données est encore conduite par des équipes et/ou des chercheurs individuels travaillant sur des sites expérimentaux ou d'observation qui ne font actuellement l'objet d'aucune coordination particulière ou d'une coordination probablement insuffisante. C'est également le cas de nombreuses observations issues de la science participative, dont les programmes sont en plein essor. Les moyens d'observation dépendent souvent d'autres communautés scientifiques : par exemple, les plates-formes haut débit en génomique existent au niveau national (par ex., centre national de séquençage) ou régional, mais aucune n'est encore portée par la communauté en écologie. Il faut aussi noter aussi que la masse importante des données existantes concernent des organismes bien ciblés (ex : parmi les mammifères, oiseaux, poissons et plantes) et nous sommes encore bien loin d'avoir une image exhaustive de la distribution, des comportements et des génomes de l'ensemble des organismes macroscopiques (ex : insectes, crustacés, champignons) et microscopiques qu'ils soient autonomes, parasitaires ou symbiotiques (virus, protozoaires, bactéries ou helminthes, ces derniers représentant 50% de la diversité spécifique). Un effort particulier reste donc à faire pour coordonner et diversifier la collecte des données en écologie (Hampton & Parker 2011).

Enfin, le manque de forces dans les approches opérationnelles, et en particulier, le

manque de transferts conceptuels, entre les approches fondamentales et les démarches de gestion ou de restauration, malgré le potentiel de retour d'expérience, ou de révision des concepts, que cette démarche peut apporter à la discipline est à souligner. Ces démarches restent difficiles à valoriser dans des revues à fort impact au niveau international, il est donc compréhensible qu'elles ne soient pas développées en priorité par les jeunes chercheurs. Cela souligne la nécessité pour les acteurs de la section de mettre en avant les avancées intellectuelles dans ce domaine.

3. Opportunités

Ecologie fonctionnelle évolutive :

Depuis peu, on voit émerger des approches novatrices rapprochant biologie évolutive et écologie des écosystèmes, qui ont par exemple permis des avancées significatives sur l'influence des contraintes évolutives sur les traits et structures de communautés, permettant de porter un regard nouveau sur la dynamique de la diversité, des écosystèmes ou des cycles des éléments. Cette jonction est nécessaire à une compréhension complète de l'écologie. Cette dimension est aujourd'hui peu représentée dans la section malgré le fort potentiel, et repose sur des collaborations interdisciplinaires combinant et valorisant pleinement les deux compétences. Ces approches peuvent relever à la fois de la section 30 et 29 et il est important de maintenir des compétences sur cette interface.

Meso-Écologie (Paysages, méta-communautés et méta-écosystèmes) : Les flux spatiaux d'organismes ont été étudiés dans le contexte du développement des théories sur les métapopulations et méta-communautés. Le concept de méta-écosystème est une extension essentielle de ces approches de l'écologie spatiale. L'approche en méta-écosystème est aujourd'hui mature et donne lieu à une production scientifique en croissance (notamment au sein de la communauté *sic*). A un moment où l'homme altère profondément la structure et le fonctionnement des paysages naturels, il est

important de comprendre et prédire les conséquences de ces changements pour définir les futures stratégies de conservation et de gestion. Les approches meta-écosystémiques peuvent fournir une bonne base pour avancer ces questions mais restent encore à connecter avec les approches classique d'écologie du paysage (e.g. socio-écosystèmes) pour devenir pleinement opérationnelles.

« Global Ecology » ou lien entre biogéographie fonctionnelle et macroécologie :

La combinaison des données sur les traits des espèces et la composition des communautés permet de décrire la structure fonctionnelle de ces dernières. Appliqué à grande échelle, on parle de « biogéographie fonctionnelle ». En quelques années ont été constitués des jeux de données de plus en plus importants, intégrant différentes échelles temporelles et spatiales pour des milliers d'organismes (e.g. TRY Plant Trait Database <https://www.try-db.org/> à laquelle de nombreux chercheurs de la section 30 ont contribué). Ces nouveaux jeux de données, alliés à une puissance de calcul et à une sophistication des logiciels nous offrent aujourd'hui une profondeur d'analyse qui n'était pas possible il y a encore dix ans. Toutefois ces efforts doivent être maintenus afin de faire basculer l'écologie dans l'ère de l'information. Les enjeux sont sur les méthodes utilisées (besoin de nouvelles méthodes adaptées à la nature de ces données originales) mais aussi sur les moyens de stockage et de calcul (implémentation d'outils capables de gérer de gros volumes de données, parallélisation, utilisation de grilles de calcul, etc.). Il faut aussi noter que la masse importante des données existantes concernent des organismes bien ciblés (ex : mammifères, oiseaux, poissons et plantes), et que nous sommes encore bien loin d'avoir une image exhaustive de la distribution, des comportements et des génomes de l'ensemble des organismes macroscopiques (ex : insectes, crustacés, champignons) et microscopiques qu'ils soient autonomes, parasitaires ou symbiotiques (virus, protozoaires, bactéries ou helminthes, ces derniers représentant 50 % de la diversité spécifique). Les développements technologiques en télédétection ont accru la résolution spatiale et temporelle des informations disponibles au niveau global. Les initiatives

(exemple Climate change initiative CCI de l'agence spatiale Européenne) pour le traitement du signal ont permis de délivrer des produits finis (densité d'arbre, surface foliaire, eau du sol, hauteur des arbres, sécheresse...) directement utilisables par la communauté scientifique d'écologie fonctionnelle. L'écologie globale et la modélisation des interactions biosphère/atmosphère a largement bénéficié de ces développements, à la fois pour identifier les processus, contraindre les modèles et évaluer les simulations. avec les nouveaux capteurs lidar, radar et la résolution affinée des capteurs optiques (Sentinel), l'écologie fonctionnelle bénéficie d'une source de données permettant d'affiner les connaissances sur les stocks et flux de matière (eau du sol, biomasse), la biodiversité de la canopée (NIRS a fine résolution), les perturbations, ainsi que la structuration et la dynamique récente des paysages (résolution 20m). En contrepartie, l'appropriation par les écologues en télédétection des connaissances et des concepts d'écologie fonctionnelle est au mieux balbutiante, par manque d'interactions entre les scientifiques de ces deux communautés, et constitue une faiblesse de la communauté SIC.

Connecter écologie théorique, écologie de terrain et expérimentation : Une force de la section 30 est la position centrale en écologie théorique. Aujourd'hui se développe la recherche dans ce domaine en lien avec une démarche empirique, liée au développement de grands dispositifs expérimentaux. Cette intégration reste cependant à renforcer afin de multiplier les tests des théories proposées, mais aussi afin d'intégrer des tests *in natura* prenant en compte les cumuls d'impact et la complexité des écosystèmes. Ce lien s'enrichit des outils, concepts et paradigmes issus de la physique tels que les changements d'état stable, les points de bascule ou plusieurs chercheurs de la section ont apporté des contributions majeures. Les méthodes se développent aussi en lien avec les développements mathématiques et on assiste à une mathématisation de l'écologie fonctionnelle, en lien avec une écologie de terrain et expérimentale basée sur des chercheurs intéressés par les tests d'hypothèses que ces théoriciens proposent.

F. Processus de surface et de sub-surface

Mots clés : géomorphologie, hydrologie, hydrogéologie, aléas

Les processus de surface et de sub-surface incluent de très nombreux processus physiques, chimiques et biologiques au sein de la zone critique que constituent la surface terrestre et la sub-surface. Ce vaste domaine aux forts enjeux sociétaux implique par conséquent des scientifiques d'horizons divers. Compte tenu du fait que les processus écologiques, microbiologiques, géochimiques ou physico-chimiques ont été discutés dans les parties précédentes, il sera principalement question dans cette partie du positionnement des chercheurs de la section 30 sur les processus physiques liés au cycle de l'eau de surface et souterrain, ou à l'altération et l'érosion des surfaces continentales. Dans les prochains paragraphes, au-delà du point de vue disciplinaire des forces et faiblesses des travaux menés au sein de ces disciplines, l'enjeu sera précisément d'identifier les nouveaux chantiers interdisciplinaires qui sont en train d'émerger au sein de la communauté.

Une dizaine de chercheurs de la section ont une activité de recherche en lien avec le cycle de l'eau continentale. Les principales thématiques abordées concernent les échanges surface-atmosphère, l'impact du changement climatique sur le cycle hydrologique continental, ou encore l'hydrologie de montagne. Les principales approches reposent sur le développement d'outils de modélisation à l'échelle continentale ou régionale, et l'exploitation des données de télédétection pour l'étude du cycle de l'eau, notamment pour améliorer la quantification des précipitations, la caractérisation de l'humidité des sols ou encore le suivi du manteau neigeux.

Un des points forts des travaux menés dans le domaine est une meilleure compréhension des interactions et rétroactions surface/atmosphère pour mieux prédire leur évolution face aux changements environnementaux, cli-

matiques ou anthropiques. Pour pallier la faiblesse de la représentation des processus par les modèles à l'échelle continentale, des travaux méthodologiques sont également menés sur les modèles et les données pour identifier les problèmes clefs liés à cette approche de modélisation. De plus en plus d'attention est également portée au rôle des eaux souterraines dans le cycle hydrologique. Malgré ces travaux récents, l'intégration de la complexité géologique souterraine dans les modèles grandes échelles reste un verrou majeur pour prendre en compte la redistribution des masses d'eau à long terme.

Certains chercheurs de la section focalisent leurs investigations sur l'hydrologie de montagne et l'hydrologie nivale, qui sont caractérisées par une forte hétérogénéité spatiale, des forçages météorologiques complexes et une très forte sensibilité aux changements climatiques. Il s'agit notamment d'exploiter au mieux des potentialités des radars et observations de terrain pour prédire, comprendre et modéliser les phénomènes hydro-climatologiques extrêmes en régions montagneuses. Un domaine connexe concerne les interactions climats-société, en lien avec la vulnérabilité des populations exposées à ces aléas. Des travaux sont également menés pour développer des méthodes de mesure et d'assimilation de données pour évaluer le stock de neige à l'échelle des massifs ou améliorer le couplage hydrologie-altération et identifier le rôle des crues dans l'exportation de matière des bassins-versants.

Un des enjeux dans les années futures sera de conserver l'approche intégrative et multidisciplinaire existant à grande échelle pour développer des travaux similaires à plus petites échelles, en tenant mieux compte des processus élémentaires. Ainsi, l'éco-hydrologie est un domaine en progression et qu'il pourrait être utile de renforcer au sein de la section. Par exemple, on note une carence de profils traitant à l'échelle du bassin-versant des interactions végétation-hydrologie en collaboration avec les écologues, qui entraîne un faible taux de recrutement sur cette thématique et qui peut constituer une menace sur son développement à plus long terme.

Une petite quinzaine de chercheurs de la section 30 développent des travaux sur le cycle souterrain de l'eau, sur des thématiques portant principalement sur i) la modélisation des écoulements et du transport dans les milieux hétérogènes, ii) l'étude des processus liés à la dispersion des solutés en milieux poreux, iii) le traçage des masses d'eaux souterraines et circulations fluides par les outils géochimiques et isotopiques, ou encore iv) l'impact du changement climatique sur les ressources en eau souterraine. Les milieux d'études sont variés, avec des expertises reconnues sur les milieux poreux, la zone non saturée, les milieux fracturés ou encore les karsts. Outre les ressources en eau, les principales applications concernent le transport de polluants ou encore le stockage dans les milieux souterrains.

Les principaux verrous viennent d'une part de la complexité de la prise en compte des processus couplés, mais aussi du manque de données sur le milieu souterrain qui n'est guère accessible. Face à ces difficultés, on observe que la communauté française essaye d'apporter des réponses complémentaires à différentes échelles. D'une part, on assiste au développement de nouveaux travaux, théoriques, numériques et expérimentaux, notamment à l'échelle porale, pour traiter, imager et décrire les processus élémentaires. Ces travaux, qui se trouvent à l'interface avec la section 10, sont portés par de jeunes chercheurs nouvellement recrutés au sein de la section.

Par ailleurs, à méso-échelle, de nouvelles méthodes de modélisation sont mises en place soit pour améliorer la représentativité ou le paramétrage des modèles, soit en développant de nouveaux modèles parcimonieux adaptés au manque de données chroniques des milieux souterrains. D'un point de vue expérimental, des travaux sont menés en parallèle pour améliorer les méthodes de mesure et de caractérisation des milieux étudiés, analyser le contenu informatif des données, étudier les relations entre les écoulements de sub-surface et de surface ou encore développer de nouvelles méthodes qui prennent mieux en compte les écoulements souterrains dans les

modèles hydrologiques régionaux. La mise en place de l'infrastructure de recherche d'OZCAR, permet d'accompagner et structurer une grande partie de ces efforts.

Un des enjeux interdisciplinaires majeurs dans les années futures sera la caractérisation fonctionnelle des communautés biologiques dans les milieux souterrains, et sa prise en compte dans les processus bio-physicochimiques.

Un petit nombre de chercheurs de la section 30, 13 sur 340, ce qui correspond à 3.5% des effectifs, étudient les processus d'érosion, d'altération et leurs conséquences sur les paysages continentaux et côtiers. Ces derniers se répartissent suivant 3 grandes thématiques: (1) les bilans d'érosion et d'altération à l'échelle du bassin-versant, (2) le couplage entre morphologie et transport de sédiment en milieu alluvial et côtier, (3) l'impact des glissements de terrain sur l'évolution des paysages (avec un volet aléa). Un recrutement récent a également permis de démarrer une activité de recherche dans le domaine de l'érosion éolienne et des pratiques agro-pastorales. Cette activité est cependant trop récente pour que l'on puisse en mesurer l'impact.

L'étude des processus d'érosion et d'altération se situe à l'interface de plusieurs sections du CNRS, les sections 05, 10, 18, 30 et 31. Les sections 05 et 10 s'intéressent davantage à la physique des processus d'érosion (couplage sédiment-écoulement, physique du transport alluvial et éolien). Les chercheurs de la section 31 sont plutôt concernés par les interactions homme-paysage. Les limites entre les sections 18 et 30 sont plus floues. De façon générale, on observe que les chercheurs de la section 18 sont davantage tournés vers l'étude des grandes échelles de temps, celles du couplage entre altération, érosion, tectonique et climat (marqueurs morphologiques et sédimentaires, couplage tectonique érosion...). A contrario, les chercheurs de la section 30 mettent souvent l'accent sur des échelles de temps plus courtes, en lien avec des problématiques environnementales. A ce titre, l'impact érosif des événements extrêmes (tempêtes, crues et glissements de terrains) est un sujet assez largement étudié

en 30. Cette distinction entre section 18 et 30 est cependant loin d'être systématique. Certains chercheurs les plus emblématiques de la section 30, s'intéressent à l'évolution des surfaces continentales à des dimensions de temps et d'espace qui peuvent être vastes.

Les chercheurs de la section 30 étudient les processus d'altération et d'érosion depuis les processus élémentaires (le mètre et la seconde) jusqu'à l'échelle du bassin versant, voire l'échelle continentale. A cette diversité d'échelles correspond une diversité d'outils méthodologiques: campagnes de terrain, outils géochimiques, télédétection, imagerie drone, modélisation numérique et modélisation analogique sur systèmes modèles en laboratoire. Les outils géochimiques sont couramment employés pour déterminer les sources de sédiment, estimer des taux d'altération et d'érosion, et quantifier les flux de sédiments sous forme solide et dissoute. La télédétection, combinée au développement de l'analyse de jeux de données de plus en plus conséquents, s'est imposée comme un outil de référence pour analyser l'impact morpho-sédimentaire des mouvements de terrain. Les chercheurs de la section 30 sont également fortement impliqués dans la mise en place de suivis environnementaux de longue durée au sein des services nationaux d'observation et dans les zones ateliers. Enfin, suivant l'exemple de leurs collègues des sections 05 et 10, plusieurs chercheurs de la section 30 développent la modélisation analogique sur systèmes modèles en laboratoire, afin d'étudier la dynamique des processus d'érosion et de transport de sédiment en conditions simplifiées et contrôlées.

Malgré le faible nombre de chercheurs impliqués dans cette thématique, l'étude des processus d'érosion et d'altération par les chercheurs de la section 30 est largement reconnue, avec une visibilité internationale de la communauté française qui place le CNRS parmi les 4 premiers publiants sur ces thématiques. Un point faible à renforcer concerne le nombre encore trop réduit d'études pluridisciplinaires consacrées au couplage entre érosion, altération et écologie. Cette thématique est cependant en train d'émerger, grâce à des recrutements et promotions récentes.

G. Télédétection, analyse et imagerie de la surface et de la subsurface

Mots clés : Télédétection, analyse et imagerie de la surface et de la subsurface, géophysique

Une petite dizaine de chercheurs développent des méthodes d'imagerie géophysique de la sub-surface. Les enjeux sont d'imager les structures actives et monitorer les processus dynamiques opérant dans le sous-sol à partir de mesures en surface ou en puits, ou bien par imagerie satellitaire. La communauté de la section 30 en géophysique est restreinte malgré les forts enjeux scientifiques et sociétaux.

L'approche classiquement développée repose sur des travaux théoriques qui permettent de jeter les bases physiques des méthodes développées, des expériences en laboratoire pour paramétrer les lois pétrophysiques indispensables à l'inversion des données et signaux acquis sur le terrain et des applications sur site dans des contextes très variés à l'aide de modèles d'inversion des données. Compte-tenu de leur forte sensibilité à la présence d'eau ou aux déplacements de charges électriques, les méthodes géo-électriques sont très souvent développées pour caractériser les processus hydrologiques liés aux écoulements, la réactivité chimique du milieu, ou encore la contamination dans le sous-sol.

Un autre domaine développé par les chercheurs de la section 30 concerne l'hydro-géodésie pour développer des méthodes originales issues de la géophysique spatiale (gravimétrie et plus récemment GPS) pour suivre l'évolution de la distribution des masses d'eau à la surface des continents, ou bien pour suivre la dynamique des structures actives d'écoulement et leurs rôles dans les échanges entre surface et sub-surface.

Les travaux menés par les chercheurs de la section dans ce domaine sont inégalement reconnus à l'échelle internationale. Mais la

place du CNRS est très bonne, voire excellente, notamment en hydro-géophysique où le CNRS est leader grâce à l'apport de certains chercheurs leaders mondiaux du domaine. Toutefois, la communauté mériterait d'être mieux structurée, afin de renforcer ce leadership et encore mieux intégrer les récents recrutements de jeunes chercheurs de la section dans le domaine. Outre la complexité des milieux souterrains, un des défis majeurs du domaine dans les années qui viennent consistera à imager la dynamique spatio-temporelle des phénomènes réactifs au sein de la zone critique. Un vaste domaine qui reste également à explorer malgré quelques avancées significatives et remarquées, est la bio-géophysique, qui a tendance à connaître un très fort développement à l'international.

La contribution du CNRS est également primordiale en télédétection de la surface en reliant les données des tours de flux avec les données de couverture et d'occupation des sols et leur évolution spatio-temporelle. Elle permet aussi des avancées notoires pour la détermination des champs de pluie et des intensités de pluie lors des événements extrêmes de plus en plus fréquents, par deux apports à relever :

- la reconstitution des précipitations par des données satellitaires

- la participation au projet Raincell (pilote par l'IRD) de reconstitution des champs de pluie et des intensités par l'utilisation de l'atténuation du signal téléphonique entre deux antennes par la présence de nuages et surtout d'hydrométéores.

III. Structures fédératives, structures d'observation et outils

A. Les zones ateliers

Les zones ateliers sont des structures fédératives regroupant des chercheurs et des unités de recherches centrées sur un territoire, sur des questions partagées favorisant les interactions entre sciences humaines et sciences dures, autour du concept d'anthropo-écosystème. Les ZA sont regroupées dans ILTER et LTER Europe, qui leur ont confié une feuille de route en vue d'une labellisation internationale d'infrastructure de recherche. Depuis 5 ans, l'analyse scientifique des ZA est confiée à la section. La difficulté de l'exercice repose sur la forte interdisciplinarité des structures, associée à une description parfois superficielle des actions de recherche passées et futures dans les dossiers de renouvellement. L'intérêt d'une telle évaluation est cependant de soumettre ces structures à l'analyse scientifique de la communauté, et de les faire connaître, car leur dimensionnement et leur vocation ne sont pas toujours clairement comprises. L'évaluation par les pairs a de ce fait clairement contribué à améliorer la lisibilité et la qualité des dossiers. L'articulation entre ZA et SNO est maintenant bien maîtrisée et la complémentarité des outils est intégrée. La section est une instance pertinente pour mesurer l'articulation et la complémentarité entre ces outils.

La section souhaiterait, en cas d'avis réservé ou défavorable pour la labellisation, avoir l'opportunité de se saisir d'une version retravaillée des dossiers à la session suivante, afin d'offrir l'opportunité aux porteurs d'intégrer les remarques de la section et de revoir leur projet.

B. Les Systèmes Nationaux d'Observation

La zone critique évolue sous l'effet de processus géologiques, physiques, chimiques, hydrologiques, climatiques, biologiques et anthropiques mettant en jeu une très large gamme d'échelles de temps et d'espace depuis le mètre et la seconde jusqu'au millier de kilomètres et au million d'années. Ces processus, liés entre eux par des couplages complexes, contrôlent la dynamique des flux environnementaux (flux d'eau, de sédiment, de carbone, flux chimiques...). Ils influencent la dynamique des paysages, la stabilité des sols, la qualité des eaux, les échanges de carbone entre l'atmosphère et les continents et, de manière plus générale, les couplages entre biosphère, hydrosphère et lithosphère. L'étude de ces processus nécessite l'observation et la mesure continue de paramètres environnementaux sur des durées longues, afin de capturer toutes les échelles de temps en jeu.

Fort de ce constat, le CNRS consacre des efforts importants au développement et au maintien de services nationaux d'observation, chargés d'acquérir des données permettant d'étudier l'évolution long-terme des surfaces continentales, et de contraindre les modèles. La mise en place des SNO dans le domaine de l'environnement a été essentielle pour fédérer les différentes communautés autour d'objets et d'observatoires communs. Cela a permis de disposer de plateformes expérimentales, remarquablement bien instrumentées pour certaines, pour développer de nouvelles méthodes de mesures et outils d'investigation, imager et monitorer certains processus, tester certaines hypothèses et développer de nouvelles méthodes de modélisation des processus de surface et de sub-surface. De nombreux candidats de la section s'appuient avec raison sur les SNO pour développer leur projet de recherche.

Cette politique s'est renforcée avec la création de « l'Observatoire de la Zone Critique Applications Recherche » (OZCAR) en 2017.

Cette infrastructure de recherche, pilotée par le CNRS, fédère en réseau une soixantaine de SNO et sites instrumentés, qui documentent les cycles de l'eau, du carbone et des éléments associés dans des contextes très différents. L'enjeu est de documenter et contraindre les changements environnementaux en cours sur les surfaces continentales. OZCAR est une des composantes françaises de l'infrastructure de recherche européenne ESFRI «eLTER».

Même si sa création est trop récente pour que l'on puisse dès à présent mesurer son impact sur la communauté, la création de cette nouvelle infrastructure devrait permettre de développer l'interdisciplinarité, mutualiser les efforts et aborder de nouveaux défis scientifiques. Sa création se concrétise également par des candidatures récentes dont les projets, au croisement de certaines des disciplines de la section, s'appuient sur l'infrastructure OZCAR et ou le réseau des zones ateliers. Les liens avec le Réseau des Zones Ateliers sont également à renforcer à l'avenir pour répondre au défi de l'intégration de l'écologie et des SHS au sein des problématiques des surfaces et interfaces continentales.

IV. Dimension fédérative et internationale

Les chercheurs de la section présentent une ouverture à l'international significative, avec en moyenne $1,18 \pm 2,44$ conférence internationale par chercheur au cours d'un contrat, et $1,43 \pm 2,2$ conférence invitée sur la même période. Les données fournies par les chercheurs dans leur rapport d'activité ne permettent malheureusement pas d'aller plus loin dans l'analyse de leur rayonnement. En particulier, il est difficile de déterminer leur implication dans l'organisation de colloques ou de sessions de colloques, car l'information n'est pas toujours formulée de manière lisible dans les rapports d'activité.

En termes de structures labellisées, outre les ZA, qui possèdent un rôle très fort de structuration, avec une dimension internationale avérée (Antarctique, Hwange), les chercheurs de la section pilotent ou sont impliqués dans une dizaine de GDR, et une douzaine d'écoles thématiques. En termes de GDRI et de LIA, la section n'a été consultée que pour une seule structure, ce qui suggère qu'elle ne pilote que peu de structures internationales, ou que ces structures échappent à son inventaire (*e.g.* PICS). De même, il est ardu de mesurer la mobilité internationale des chercheurs après leur recrutement, mais l'analyse des dossiers fait fréquemment référence à des missions de courte ou moyenne durée (quelques mois à 1 an).

Conclusion

Dans le contexte de l'Anthropocène, les recherches menées dans le périmètre disciplinaire de la section 30 sont d'une importance cruciale pour mesurer l'impact des activités anthropiques sur les surfaces et interfaces continentales, et identifier les seuils de résistance, de résilience et d'irréversibilité des altérations anthropiques auxquels les écosystèmes sont soumis. L'analyse bibliographique menée par les acteurs de la section dans ce travail de conjoncture a démontré que les chercheurs de la section et des laboratoires associés sont parmi les mieux placés dans la communauté scientifique pour répondre à ces enjeux. Les difficultés que ces chercheurs doivent et devront surmonter sont la nécessité de recourir de plus en plus à des mesures en continu de paramètres de plus en plus précis, et la nécessité de disposer d'états de références et de suivis à long terme. L'assise expérimentale est particulièrement indispensable pour décortiquer les processus qui agissent de manière synergique dans les conditions naturelles. La complétion de bases de données précises et reposant sur des expertises taxonomiques et moléculaires avérées est un prérequis indis-

pensable pour que les chercheurs en modélisation et traitements de mégabases de données puissent effectuer leur travail de fouille et d'expertise globale. On note en section une très forte représentation des candidats en modélisation au détriment des chercheurs possédant des expertises écosystémiques et taxonomiques, probablement car le coût d'acquisition de la donnée contribue à diminuer la rentabilité en termes de publications (rang et nombre) des chercheurs concernés. Il est probable que la section doive s'engager dans une politique offensive de soutien aux jeunes chercheurs faisant la part belle à l'observation des processus écologiques, physiques et chimiques in situ,

afin de conserver cette expertise essentielle à l'atteinte des objectifs scientifiques concernant les surfaces et interfaces continentales. Un autre point de vigilance à souligner est que l'étude des surfaces et interfaces continentales exige de la part des jeunes chercheurs une dose de plus en plus importante d'interdisciplinarité. Les candidats à forte interdisciplinarité peuvent être défavorisés car leur capacité à défendre leur dossier face à un jury parfois trop centré sur l'excellence disciplinaire peut être battue en brèche. La section actuelle alerte sur ces risques, qu'elle essaie en interne de surmonter.

ANNEXE 1

Champs thématiques couverts par la section 30

T1	Ecotoxicologie/toxicologie environnementale et transferts de polluants
T2	Microbiologie environnementale
T3	Biogéochimie et physicochimie des interfaces, cycles des éléments
T4	Paléoécologie et paléoenvironnements quaternaires
T5	Écologie fonctionnelle
T6	Dynamique des écosystèmes continentaux (incluant les milieux urbains), estuariens, lagunaires, côtiers et marins
T7	Processus de surface et de subsurface
T8	Télétection, analyse et imagerie de la surface et de la subsurface

SECTION 31

HOMMES ET MILIEUX : ÉVOLUTION, INTERACTIONS

Composition de la section

Isabelle THERY-PARISOT (présidente de section), Etienne COSSART (secrétaire scientifique), Pascal ADALIAN, Carole BÉGEOT, Cyrille BILLARD, José BRAGA, Laurent BRUXELLES, Sandrine COSTAMAGNO, Jérôme DUBOULOZ, Alexa DUFRAISSE, Nejma GOUTAS, Véronique HUMBERT, Vincent JOMELLI, Laurent KLARIC, Philippe KLEIN, Agnès LAMOTTE, Mathieu LANGLAIS, Gregor MARCHAND, Véronique MATHIEU, Stephen ROSTAIN, Valéry ZEITOUN.

Résumé

Face à l'ampleur des enjeux (notamment environnementaux) auxquels est confrontée actuellement notre société, la section 31 promeut des recherches visant à comprendre les modalités de l'implantation progressive de l'Homme et la part des transformations de la planète qui lui revient. En favorisant et soutenant l'interdisciplinarité (archéologie, anthropologie biologique, géographie physique), elle contribue à explorer des fronts de recherche répondant aux défis sociétaux et environnementaux du XXI^e siècle. Dans un contexte de fragilisation de l'emploi scientifique, le renouvellement des effectifs et la stabilité liée au statut de fonctionnaire sont essentiels dans le cadre des travaux scientifiques couverts par la section 31. En effet, la production de données primaires à travers le

travail de terrain (fouille, étude des collections, cartographie fine, métrologie et suivis environnementaux, etc.) comme l'expérimentation sont nécessairement chronophages et nécessitent un temps d'acquisition long, incompatible avec le rythme effréné du « *publish or perish* ». De même, l'investigation de terrains « sentinelles » des changements environnementaux ou encore d'archives sédimentaires ou mobilières singulières, emblématiques des transitions du passé, nécessite un investissement en temps antagonique avec des emplois non pérennes. La liberté de recherche et l'autonomie des chercheurs.e.s sont des conditions *sine qua non* pour permettre d'avoir un recul dépassionné sur des sujets d'actualité parfois débattus, voire clivants, et faire émerger des thématiques novatrices et motrices sur le plan international.

Introduction

La mandature actuelle du Comité National fait face à une diminution drastique des emplois de la recherche scientifique, concernant tous les corps de métiers : chercheur.e.s, ingénieur.e.s, technicien.ne.s. Déjà mentionnée lors du précédent rapport, cette diminution menace dorénavant directement la structuration de la recherche, et ce à différents niveaux. Sont ainsi menacées les recherches de fond, nécessitant des développements lents et l'acquisition minutieuse de données inédites, sur des terrains parfois lointains ou difficiles d'accès. À travers l'étiollement du recrutement des personnels en appui à la recherche, sont également entravés tant le développement inédit de méthodes de traitement et de bancarisation de données, que le maintien des savoir-faire (le plus souvent reconnus internationalement) développés au sein des plateaux techniques de nos unités. Cette menace fait que des champs thématiques et méthodologiques entiers sont actuellement en péril, faute de pouvoir être revitalisés par de nouveaux recrutements.

Par son positionnement systémique en interface directe entre les sociétés et les milieux qu'elles occupent, la section 31 produit pourtant des connaissances fondamentales permettant de relever les défis majeurs qui attendent la société du XXI^e siècle notamment l'adaptation aux conséquences du réchauffement climatique et aux changements environnementaux associés à l'anthropisation, la diminution programmée des ressources, etc.

La recherche développée au sein de la section s'inscrit dans différentes temporalités (les quelques dernières années ou décennies, les temps géologiques remontant jusqu'au Mio-Pliocène). Cette amplitude temporelle permet un décryptage des modalités de l'implantation progressive de l'Homme et l'identification des impacts de l'anthropisation sur la planète. Une recherche de fond sur ces sujets vise à reconstituer et qualifier de façon dépassionnée, ces transformations qui ont abouti à l'effondre-

ment d'un système tout comme celles qui ont donné lieu à des transitions réussies.

I. Périmètre et positionnement général

La section 31 est pilotée par l'INEE (14 UMRs en rattachement principal, 152 chercheur.e.s) en étroite collaboration avec l'InSHS (7 unités en rattachement principal, 70 chercheur.e.s). Quelques unités ont aussi un rattachement secondaire avec l'INSU, 2 chercheur.e.s, et 2 chercheur.e.s sont affectées dans des unités pilotées par l'INSB et l'INSIS. Ce rattachement multiple témoigne d'un ancrage très fort de la section dans les Sciences environnementales et dans les Sciences Humaines et Sociales.

1. Contours disciplinaires

La section 31 est structurée autour de trois grands champs disciplinaires, l'anthropologie biologique, les approches culturalistes (incluant la bioarchéologie : étude des pratiques sociétales liées à l'utilisation des ressources biologiques), et les approches environnementales (paléoenvironnements et géographie physique).

2. Acteurs et démographie

Les chercheur.e.s

La section compte, au 1^{er} septembre 2019, 226 chercheur.e.s, dont 102 femmes et 124 hommes. La répartition des chercheur.e.s dans les grands domaines est la suivante (figure 1) : Anthropologie biologique : 47 (dont 2 paléogénéticiens) ; Approches culturalistes : 136 (Préhistoire et Protohistoire 82 ; Bioarchéologie, 43, Science des matériaux/archéométrie : 11) ; Approches environnementales : 44 (Paléo-environnements : 24 ; Géographie Physique : 21).

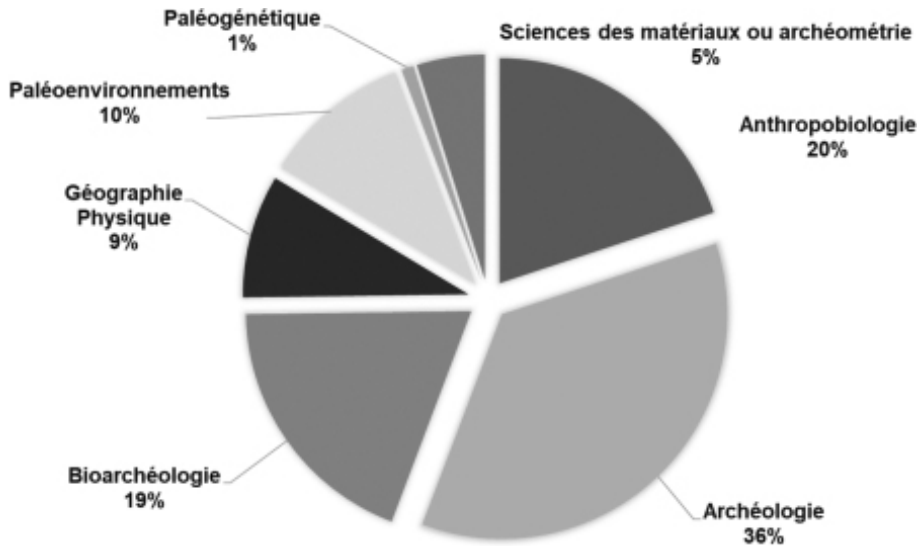


Figure 1 : Représentation par champs disciplinaires.

La pyramide des âges n'est pas équilibrée (figure 2) : 54 départs à la retraite sont prévus dans les 10 prochaines années (57 ans et plus). Depuis le rapport de conjoncture de 2009, la section a perdu trois fois plus de chercheur.e.s. que l'ensemble du CNRS (15 personnes au

total). Au rythme des recrutements actuels, une érosion drastique des effectifs de la section 31 s'opère alors que le CNRS et son président clament haut et fort leur engagement dans les problématiques sociétales actuelles, notamment les défis environnementaux.

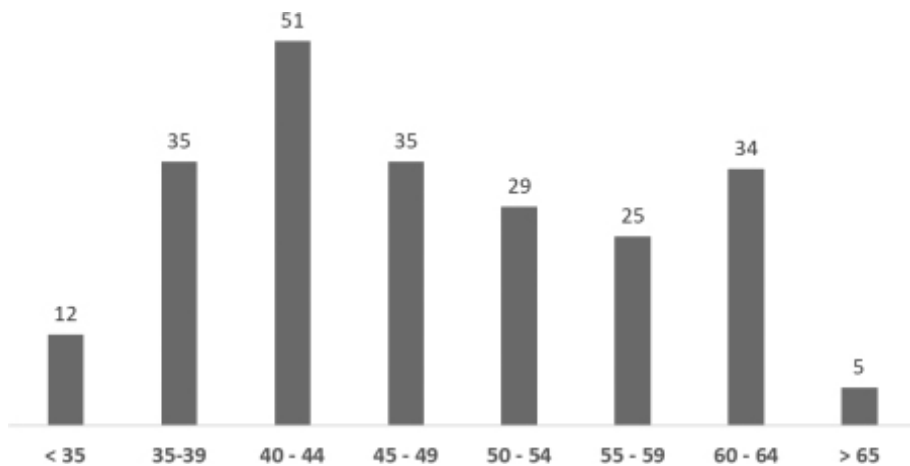


Figure 2 : Profil d'âges.

La section compte 72% de CR (dont 68% de CRCN et 4% de CRHC), et 28% de DR (dont 19% de DR2, 7% de DR1 et 2% de DRCE).

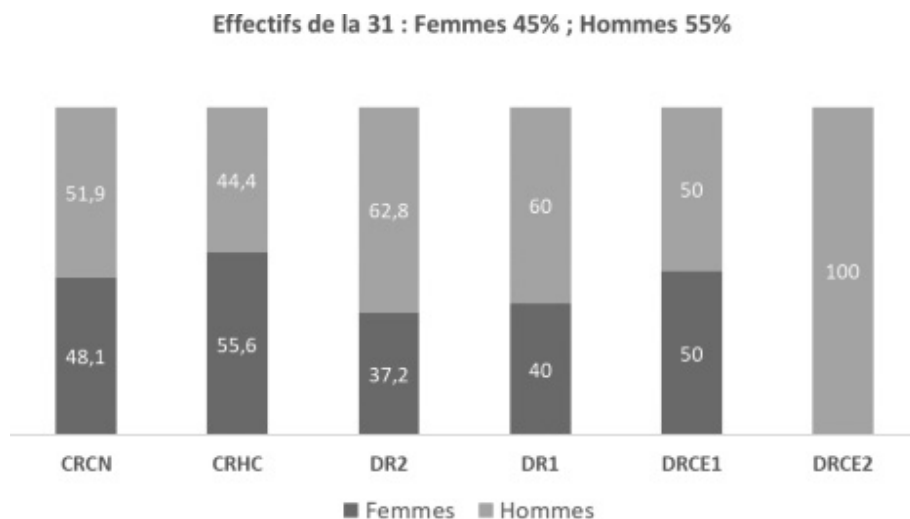


Figure 3 : Représentation par grade et par genre.

La section 31 compte moins de femmes que d'hommes avec un défaut notable d'accès aux différents grades de DR pour les femmes, malgré les efforts de rééquilibrage depuis plusieurs années (figure 3). Les chiffres masquent des trajectoires individuelles non strictement genrées mais ces disparités, présentes également au CNRS, reflètent des différences structurelles de parcours professionnels encore profondément ancrées dans la société.

Les ingénieurs et les techniciens

L'effectif total est de 195 agents affectés à des laboratoires rattachés en principal à la section 31. Ces agents sont rattachés aux instituts INEE (145) et INSHS (50) (figure 4).

Une caractéristique de la section est le très faible nombre d'IT des BAP B et surtout C. Les

effectifs de la BAP A sont nettement inférieurs à ceux des BAP D, J et E, et équivalents à ceux de la BAP F. Les BAP A, B et C représentent seulement 15% du nombre total d'ITA, 28,8% si l'on ajoute la BAP E. La forte représentation de la BAP D s'explique par les métiers de l'archéologie et de l'archéométrie, des sciences de l'information géographique et de la « production, traitement et analyse de données ».

39 ITA sont en situation de prendre leur retraite dans les dix ans qui viennent (57 ans ou plus). Parmi eux, 14 agents de la BAP D (26% de l'effectif), 12 de la BAP J (30%), 9 de la BAP F (37,5%, la plus exposée). Les agents de plus de 46 ans représentent 63% de la population des IT de la section 31, prémices d'une érosion préoccupante des effectifs des différentes catégories IT qui constituent des acteurs irremplaçables du bon fonctionnement des laboratoires et plateaux techniques.

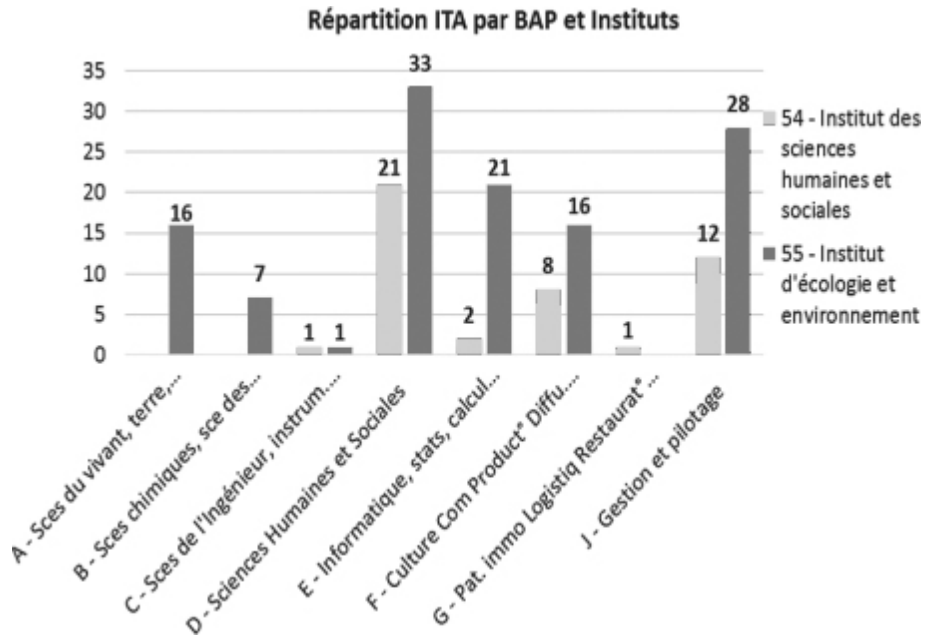


Figure 4 : Répartition des IT par BAP et Instituts.

II. Thématiques

A. Anthropologie biologique

L'anthropologie biologique étudie l'histoire évolutive de la lignée humaine (en interaction avec son milieu, à toutes échelles d'espace et de temps). Elle traite des adaptations, des propriétés biologiques et sociales des membres de la lignée (homininés), ce qui peut conduire à prendre en compte certains référentiels non-humains. Son approche est diachronique (du Mio-Pliocène à l'actuel) et traite tant des structures que des processus concernant les individus et les populations dans leurs différentes composantes biologiques, à l'exclusion des sciences des maladies et de l'art de les guérir.

L'anthropologie biologique peut être subdivisée en 5 grandes thématiques :

- l'anthropologie du vivant incluant l'anthropologie médico-légale (13%) ;
- la paléoanthropologie étudiant l'évolution et l'origine de notre lignée du Mio-Pliocène jusqu'à l'Holocène (32%) ;
- la bioanthropologie s'intéressant aux dynamiques biodémographiques et aux causes et conséquences des variations des populations pré-protolithoriques et historiques (17%) ;
- l'archéothanatologie qui recouvre les dimensions culturelles, sociétales et bioanthropologiques (25%) ;
- la paléogénétique, paléogénomique et la génétique de grands marqueurs populationnels (par exemple, les groupes sanguins), abordant l'évolution d'humanité aujourd'hui fossiles, l'étude des peuplements, les structures de parentés, les causes de la diversité humaine par le prisme du génome (13%).

La paléanthropologie est bien visible à l'international mais devrait investir davantage les périodes les plus anciennes de son périmètre et diversifier ses supports d'étude aujourd'hui souvent très spécialisés, essentiellement odontologiques. Des recherches plus généralistes produisant et analysant de larges bases de données sont encouragées. Des perspectives nouvelles s'ouvrent avec le développement de nouveaux outils phylogénétiques permettant d'intégrer les données fossiles aux modélisations fondées sur les référentiels actuels.

L'archéothanatologie sert souvent de modèle à l'international ; depuis l'analyse détaillée de la sépulture à la caractérisation des parentés au sein de l'espace funéraire, des groupes biologiques, des territoires, des trajectoires culturelles et des processus évolutifs. Ses efforts doivent porter une réflexion méthodologique de fond sur la représentativité des échantillons et les biais dans les interprétations nécessitant un élargissement du spectre culturel / chronologique / géographique.

L'anthropologie du vivant est en net déclin. La recherche forensique, bien que répondant à une nécessité sociétale n'est portée par aucun chercheur.e. CNRS.

Si les nombreuses archives produites (données de base) constituent le fondement des raisonnements, leur diffusion et leur accessibilité font également défaut, notamment faute de support dédié. La combinaison des approches classiques et novatrices (géochimie, génomique, imagerie, etc.) s'avère indispensable pour le renouvellement des questionnements. Cependant cette ouverture ne doit pas se faire au détriment des approches qui fondent les questionnements de la discipline.

L'anthropologie biologique se situe à l'interface ou interagit avec plusieurs thématiques d'autres sections telles que la section 32 du CoNRS pour l'archéothanatologie, la 29 pour la paléanthropologie ou la 21 pour les développements en génomique. Au titre des outils et des plateformes techniques, l'anthropologie biologique a investi les domaines de la géochimie isotopique, des éléments traces, des outils d'imagerie (synchrotron, etc.) et de la géné-

tique. Elle doit désormais aborder le renouvellement lié à l'essor de la métagénomique.

B. Les approches culturalistes

1. Préhistoire et Protohistoire

L'archéologie appliquée au Paléolithique traite de l'Homme dans son environnement passé, témoin et déjà acteur de la transformation des milieux et de la biodiversité. Les études sur cette vaste période portent sur les sociétés et les milieux des populations de chasseurs-cueilleurs-collecteurs, mais aussi sur l'évolution des comportements des hominidés sur un temps long ou court. Ainsi, du Paléolithique ancien au Paléolithique final, la chronologie des peuplements, les transitions, les migrations et mobilités, les territoires, les productions matérielles et leur évolution / diffusion, les « marqueurs identitaires », la fonction des outils en matières minérales, dures animales, l'acquisition et l'exploitation différenciée des ressources, les processus de formation des sites, leurs fonctions et fonctionnements, les organisations sociales, les pratiques cynégétiques, symboliques et funéraires, les savoir-faire et la transmission, constituent autant de champs de recherche pertinents pour comprendre ces sociétés passées et proposer des scénarios culturels évolutifs. Si l'Europe constitue un terrain privilégié, la Préhistoire au CNRS compte des terrains dans le monde entier.

Les travaux sur le Mésolithique participent de la dynamique de recherche portée par la Préhistoire ancienne, notamment en ce qui concerne les analyses spatiales des habitats, l'identification des pratiques de mobilité collective ou les techniques, mais avec des interrogations particulières liées aux ensembles funéraires. Se pose aussi la question du mode de participation des sociétés autochtones au processus de néolithisation. La question des dynamiques historiques porte sur différents milieux spécifiques ayant constitué des barrières ou des interfaces (littoraux, montagnes) et à différentes échelles (Europe, Monde).

Pour les sociétés agraires et agro-pastorales et les premières sociétés complexes de l'Holocène, dans l'Ancien et le Nouveau Monde, les recherches s'appliquent à mieux cerner les mécanismes de diffusion des modes de vie néolithiques et à mieux appréhender les processus de persistance des chasseurs-collecteurs et d'émergence des sociétés complexes, des villes et de l'État. Ainsi, sont traitées les questions de la variabilité temporelle et spatiale des fonctionnements, dynamiques et stratégies socio-économiques des différentes communautés et des interactions entre différents courants de néolithisation.

La technologie culturelle, les sciences des matériaux, mais aussi l'anthropologie des techniques, l'ethnoarchéologie et l'ethnohistoire (référentiels actualistes), les pratiques funéraires, la chronométrie, les modélisations spatiales et prédictives, la taphonomie des assemblages, sont mises en œuvre pour examiner l'évolution des systèmes techniques et des structures sociales durant ces périodes. Cette approche concerne les productions artisanales, les pratiques alimentaires, l'utilisation des ressources, les unités de production. Sont aussi étudiés la répartition (âge/genre/lieu) des tâches, les formes de l'habitat, le statut des sites, de même que les mécanismes d'innovation, de diffusion et d'emprunt technique, ou encore la dimension symbolique de ces pratiques. Des référentiels taphonomiques, technologiques, tracéologiques ou géologiques (passés ou actualistes) concernant différents matériaux (os, pierre, argile, métal, etc.), tous types d'artefacts ou matériaux d'usage (ex. : colorants) et différentes aires géographiques sont élaborés. Plusieurs mobilisent de nouveaux outils (bio-géochimie, imagerie RX, spectrométrie, introspection numérique, modélisation). Les UMRs développant ces approches ont un fort rayonnement à l'international, comme la technologie culturelle appliquée à différents matériaux ou la tracéologie.

Les sites archéologiques ou les paléopaysages sont des objets d'étude complexes qui nécessitent l'interaction de dizaines de disciplines. Les sciences des matériaux permettent de pondérer les contraintes qui pèsent sur

les choix techniques, tandis qu'une connaissance approfondie des écosystèmes permet de juger des organisations économiques et de leur degré de résilience. On note ces dernières années le développement d'analyses des crises environnementales et sociales et leur mise en perspective avec l'Actuel. Il émerge également un intérêt nouveau pour le patrimoine immatériel actuel en danger (compétences techniques, savoir-faire traditionnels). Une véritable ambition émerge dans l'essor d'analyses intégrées des structures économiques et culturelles du passé, adossées à des modélisations à large échelle. Par des approches multiscalaires, elles visent notamment à éclairer la géographie des réseaux sociaux, les rythmes des phénomènes culturels, les modes de transmission, de contact, d'emprunt, de résilience et d'hybridation culturelles. Les approches éco-éthologiques et économétriques sont désormais couplées à des paramètres culturels quantifiés, mais aussi à des contextes anthropologiques et environnementaux. Le défi de parvenir à un dialogue interdisciplinaire doit s'accompagner d'un renouvellement épistémologique et conceptuel.

Les méthodes de datation disponibles ou en développement restent essentielles pour maîtriser la variable temporelle des phénomènes étudiés. Par ailleurs, il apparaît crucial d'instaurer une relation équilibrée entre archéologie et paléo/génétique-génomique pour répondre à des problématiques fondamentales mais moins médiatiques que celles liées aux questions populationnelles et identitaires.

2. Bioarchéologie

À la croisée des sciences biologiques et archéologiques, la bioarchéologie est un champ de recherche par essence interdisciplinaire, nécessitant des compétences plurielles. Restes végétaux et animaux, sous toutes leurs formes, sont étudiés par des approches variées qui se déclinent selon la spécificité des matériaux d'étude. Les thématiques développées sont tout autant tributaires du matériau d'étude que de la période chronologique considérée.

En ce qui concerne les restes fauniques, les économies de chasse, de pêche et de collecte sont abordées dans leur contexte socio-écologique avec des développements importants sur les techniques d'acquisition et d'exploitation des ressources animales au moyen d'approches actualistes (ethnoarchéologie, archéologie expérimentale). Cette approche anthropologique des techniques, qui rejoint les problématiques relatives aux cultures alimentaires, est une spécificité française qu'il est essentiel de continuer à promouvoir et à développer. C'est notamment le cas des études portant sur les coquillages, crabes et poissons qui, en contexte archéologique, restent largement sous-exploitées en dehors de la communauté des archéozoologues français. L'approche actualiste est au cœur des études taphonomiques qui font surtout l'objet de développements en contexte paléolithique. Les problématiques relatives à l'élevage et à la zootechnie sont de fait circonscrites aux périodes plus récentes ; l'origine de la domestication et sa diffusion ou non selon les contextes géographiques y apparaissent comme des thématiques clés.

Pour ce qui est de l'archéobotanique, la diversité des restes végétaux conservés en contexte archéologique (pollen, semences, bois, charbons de bois, phytolithes, etc.) et leur condition de conservation impliquent le plus souvent une spécialisation des chercheurs.e.s même si certains cumulent plusieurs spécialités. Dans le cadre de l'étude des interactions hommes-milieus, l'archéobotanique s'intéresse à la caractérisation et à l'exploitation des ressources végétales, à l'histoire de l'agriculture et de l'alimentation, à la domestication des plantes et à leur diffusion, au commerce, aux usages et aux modalités de mise en gestion des ressources forestières, au combustible, à l'artisanat. Elles sont développées dans tous types de contextes, le plus souvent sur la longue durée et au sein d'unités géographiques cohérentes. Ainsi, les thématiques de l'archéobotanique alimentent directement les problématiques liées aux modalités d'adaptation des sociétés à leur milieu. Elles enrichissent également nos connaissances sur l'impact des changements

environnementaux par l'étude de l'évolution des formations végétales, de la paléoécologie forestière, des routes de diffusion de certains taxons ou encore de l'existence de zones refuges.

Par l'étude des pratiques humaines, l'archéozoologie et l'archéobotanique interrogent en interdisciplinarité la complémentarité des ressources alimentaires pour les périodes anciennes (Paléolithique et Mésolithique). Pour les périodes plus récentes, les parallèles entre domestication animale et végétale, la diversité des systèmes sylvo-agro-pastoraux, leur résilience, et les modalités de structuration des paysages qui en résultent sont étudiés, participant ainsi directement au débat actuel de l'agroforesterie face au changement climatique.

C. Géographie physique et paléoenvironnements

La géographie physique s'intéresse à la dynamique spatio-temporelle des processus qui animent les milieux physiques, et leurs interactions avec les sociétés humaines. Elle comprend quatre principaux champs de recherche : la géomorphologie (processus d'érosion, enregistrements morphologiques et sédimentaires des changements climatiques et de l'anthropisation), la biogéographie (dynamiques spatiales de la biosphère), l'hydro-climatologie, les paléoenvironnements. Les fenêtres temporelles explorées sont variées, de l'échelle du Quaternaire à celle de la décennie avec des projections sur le futur (*scenarii* prospectifs, vers l'horizon 2100).

La reconstitution des dynamiques passées à travers les archives sédimentaires constitue un point fort de la géographie physique, aux applications renouvelées, notamment en géoarchéologie. L'amélioration récente tant des méthodes de prospection géophysique que des méthodes de datation est à l'origine de ce dynamisme. Généralement focalisées sur

l'Holocène, les études sont le champ d'interactions scientifiques privilégiées entre le domaine des sciences de la Terre et les SHS. Autour de consortiums structurés et de vastes programmes de recherche, la communauté scientifique française est bien reconnue à l'international. Sur des terrains emblématiques des changements environnementaux passés (le bassin méditerranéen, les grands corridors fluviaux, les zones de montagne), la communauté française a développé une expertise particulièrement reconnue dans l'analyse de marqueurs chronostratigraphiques et biochronologiques permettant de définir les conditions environnementales des sociétés du passé (gestion des ressources, stratégies face aux aléas et risques naturels).

La « morphodynamique actuelle » associe des échelles temporelles multiples variant de l'événement instantané (typiquement l'aléa naturel) à l'évolution séculaire des systèmes. Le recours plus systématique à de la métrologie fine (imagerie drone, Lidar) couplée à des méthodes relevant de la géomatique permettent de produire et synthétiser de riches bases de données quantitatives permettant de comprendre l'évolution des milieux en prise avec les changements climatiques, et/ou les forçages anthropiques. Ces méthodes investissent également des terrains archéologiques.

Un enjeu actuel est de dépasser ces deux échelles de temps dont la modélisation constitue en soi un champ de recherche fécond. Il s'agit notamment de dépasser les reconstitutions diachroniques « discrètes » effectuées à travers de simples clichés statiques pour prendre en compte le temps « continu ». S'ouvrent alors de nombreuses perspectives pour modéliser les équilibres possibles dans le fonctionnement d'un système et comprendre pourquoi un équilibre a été particulièrement atteint et pas un autre. Ces démarches peuvent notamment servir de fondement à une rétro-analyse du fonctionnement dynamique des milieux du passé et à mieux cerner, hiérarchiser, les forces qui ont animé ces systèmes.

II. Forces et faiblesses, analyse SWOT

A. Forces et faiblesses transversales à la section 31

Face à l'ampleur des enjeux (notamment environnementaux) auxquels est confrontée actuellement notre société, une force de la section 31 est de favoriser et soutenir l'interdisciplinarité pour explorer des fronts de recherche, ou encore de stimuler les coopérations inter-institutionnelles. Grâce aux UMRs, associées aux universités, aux DRAC, à l'Inrap et aux collectivités territoriales, elles collaborent également avec des institutions locales et des partenaires socio-économiques. La stabilité liée au statut de fonctionnaire est essentielle dans le cadre des travaux scientifiques couverts par la section 31. En effet, la production de données primaires à travers le travail de terrain (fouille, étude des collections, cartographie fine, métrologie et suivis environnementaux, etc.) comme l'expérimentation sont nécessairement chronophages et reposent sur un temps d'acquisition long, incompatible avec le rythme effréné du « *publish or perish* ». De même, l'investigation de terrains « sentinelles » des changements environnementaux ou encore d'archives sédimentaires ou mobilières singulières, emblématiques des transitions du passé, nécessite un investissement en temps antagonique avec des emplois non pérennes. La liberté de recherche et l'autonomie des chercheurs sont des conditions *sine qua non* pour permettre d'avoir un recul dépassionné sur des sujets d'actualité parfois débattus, voire clivants, et faire émerger des thématiques novatrices et motrices sur le plan international.

Au chapitre des principales faiblesses de la recherche conduite dans les UMRs de la section 31, on ne peut manquer de citer celle liée à la complexité grandissante du paysage de l'ESR et des outils pilotés par le monde politique. La

place du CNRS et de ses UMRs y est souvent difficile à appréhender. Les grands équipements de recherche sont de leur côté souvent mal connectés aux réalités de la recherche dans les unités, tant institutionnellement que dans l'adéquation des solutions apportées.

La multiplication des appels à projets engendre elle aussi plusieurs effets collatéraux contreproductifs. Le premier est celui du temps consacré à la réponse puis à la gestion des offres, qui empiète directement sur la mise en œuvre concrète de la recherche, et ce pour des taux de réussite extrêmement faibles. En effet, la section 31 est en position d'interface entre Sciences de l'Environnement et SHS, ce qui place la plupart des projets en inadéquation avec les panels d'évaluation (dans le cadre des ERC et des ANR notamment).

Le second est afférent aux thématiques dites « prioritaires » qui conduisent à se focaliser sur une recherche en quête de retour médiatique sensationnel ou d'opérationnalité immédiate au risque de délaisser des problématiques qui seront demain prioritaires. Parallèlement, un manque préjudiciable de financements en interne au CNRS, notamment en SHS, est notable pour des projets à moyen terme à coûts intermédiaires (10 à 15 k€ sur plusieurs années). Ces projets permettraient pourtant une continuité des collaborations et des projets sur le terrain et le développement d'outils légers adaptés à nos disciplines ; en témoigne la baisse du nombre de projets type IEA, IRL, IRN, etc, jusque-là soutenus. Si des solutions ponctuelles existent pour des équipements d'instrumentation et d'imagerie (*via* les DIM des régions par ex.), leur capacité et leur pérennité sont trop souvent amoindries par la faiblesse du support RH qui leur est associé. Enfin, le manque de personnels en délégation en appui réel au montage de projets sur financements (ANR, ERC, H2021 Europe, etc.) est en profonde contradiction avec l'exhortation de l'ensemble du système de recherche à la quête de financements de ce type.

Du point de vue des moyens humains, financiers et techniques, une menace récurrente est liée au sous-effectif ou à l'absence des personnels pour l'ingénierie, le soutien et

le support à la recherche : gestion, administration et informatique en premier lieu ; mais aussi géomatique, analyses 3D, gestion BDs, Web en soutien et développement. Cela affecte en premier chef la fonction de direction d'Unité sur-sollicitée avec une grande hétérogénéité des supports administratifs. Les plateaux techniques sont également menacés : difficultés de maintenance, difficultés à mettre en œuvre les traitements analytiques, mise en péril de savoir-faire technologiques, difficultés à capitaliser les données, faiblesses des recrutements en ingénierie de haut niveau, etc.

B. Forces et faiblesses en anthropologie biologique

1. Positionnement institutionnel

L'anthropologie biologique s'inscrit totalement au sein de la 20^e section du CNU ; les champs disciplinaires de l'anthropologie du vivant et de la paléogénétique étant également concernés par les 67^e et 68^e sections du CNU. Les effectifs des enseignant.e.s-chercheur.e.s en anthropologie biologique à l'Université (dépendant des sections 20 ou 67-68 du CNU) sont bien trop faibles au regard de ce qui existe dans nombre de pays occidentaux, avec 5 professeurs (Poitiers, Toulouse, Aix-Marseille, Bordeaux) et 7 maîtres de conférences (Aix-Marseille, Bordeaux, Poitiers, Paris), la complémentarité du MNHN est insuffisante pour pallier ce déficit (3 professeurs et 9 maîtres de conférences). En conséquence, l'anthropologie biologique se développe majoritairement au CNRS. En section 31, elle regroupe 47 chercheur.e.s (49% de femmes) répartis sur quatre pôles principaux : Paris (UMR 7194, 7206, 7207, 7041, 7179, 8096), Marseille (UMR 7268), Bordeaux (UMR 5199) et Toulouse (UMR 5288, 5174). Elle est particulièrement bien positionnée dans la communauté internationale, et ce à plusieurs niveaux, ce qui constitue une première force pour les UMRs mais, à l'instar des autres thématiques de la

section 31, cette démarche n'est pas toujours suffisamment soutenue.

2. Bilan pluriannuel des recrutements CNRS en termes de thématiques et de méthodes de recherche

L'archéothanatologie est une spécialité où la France reste en pointe. Toutefois, une meilleure formalisation des fondamentaux doit accompagner la mobilisation des outils et des méthodes mis en œuvre. Ayant subi une politique d'orientation préférentielle de ses emplois vers l'archéologie préventive entre 2010 et 2015, un rattrapage récent a été opéré en termes de recrutement au CNRS.

Les anthropologues de la section 31 doivent continuer de s'approprier les nouveaux outils utiles pour l'étude de la diversité génétique des populations humaines actuelles et la paléogénomique / génomique / épigénomique / métagénomique afin d'en maîtriser l'usage et de les adapter aux contextes archéologiques.

Les implications et les activités des paléoanthropologues sur le terrain restent très visibles à l'international. Toutefois un regard sur les phases les plus anciennes de l'histoire de la lignée humaine (Mio-Pliocène) et une diversification des cibles anatomiques (non dentaires) doivent être opérés.

Au cours des 5 dernières années (depuis 2014), 8 chercheur.e.s ont été recrutés ; 3 en paléoanthropologie, 3 en archéothanatologie / bioanthropologie, et 2 en anthropologie du vivant. Ces recrutements permettent de soutenir certains développements méthodologiques, dont les approches de terrain en bioanthropologie ou l'imagerie appliquée à la paléoanthropologie, tandis que d'autres, dont la paléogénomique mais surtout l'anthropologie forensique, ont été peu favorisés.

L'anthropologie biologique est globalement sous-représentée en France et sa répartition sur le territoire national est déséquilibrée, distribuée en quatre pôles. L'avenir de l'anthropologie biologique est par ailleurs très préoccupant au regard de sa balance démogra-

phique déficitaire depuis dix ans. Cette tendance devrait s'aggraver suite au départ supplémentaire de 13% de son effectif d'ici à 10 ans. De façon plus détaillée, l'anthropologie du vivant ne compte que six chercheur.e.s en poste dont deux partiront à la retraite d'ici 2020. D'un intérêt sociétal renouvelé, cette thématique doit se développer, en particulier dans le domaine forensique qui peine à trouver sa place au CNRS malgré l'existence de trois pôles en France (Paris, Toulouse et Marseille).

C. Forces et faiblesses en archéologie culturaliste

1. Positionnement institutionnel de l'archéologie au CNRS

La section 31 compte 82 chercheur.e.s en archéologie auxquels il faut ajouter 7 spécialistes des datations relevant de la section. Une force majeure de la recherche en archéologie au CNRS réside dans la diversité et la complémentarité des profils et des thématiques qui y sont représentés (technologie lithique : 30 ; technologie céramique : 15 ; structuration de l'habitat : 12 ; « matières dures animales » (technologie et tracéologie) : 7 + 2 IR ; art/symbolisme : 6 ; métallurgie : 5 ; tracéologie (lithique essentiellement) : 5 ; sel : 1 ; modélisation : 1).

De la fouille à l'étude des collections en passant par différentes analyses, l'archéologie articule une démarche culturaliste à des approches généralistes et plus spécialisées. Elle repose donc sur un équilibre vital mais fragile entre tous les champs disciplinaires, *via* des recrutements réguliers et raisonnés de chercheur.e.s tout autant que d'ingénieurs polyvalents, au risque d'une perte de savoir-faire et d'une diminution de la manne documentaire qui contraindrait, à terme, les spécialistes à dépendre d'organismes extérieurs au CNRS pour leurs objets d'étude.

En France métropolitaine, le développement de l'archéologie préventive depuis les années 1990 a révolutionné les connaissances

sur les premières sociétés agro-pastorales. Les apports de ces nouvelles méthodes d'exploration des sites (mécanisation, surfaces de fouilles étendues, gestion de grands corpus de données) ont eu un peu moins d'impact pour les recherches sur la Préhistoire plus ancienne, qui restent principalement dépendantes des recherches dites programmées, sauf pour la mise au jour de sites de plein air. Les UMRs d'archéologie intègrent toutes désormais des personnels de l'INRAP, des collectivités territoriales, du ministère de la culture. La mise en concurrence d'opérateurs privés/publics dans les débats sur les restructurations du paysage de l'archéologie nationale a souligné la nécessité de garantir qualité, éthique, conservation pérenne et restitution vers le public. Les interactions en termes de politique patrimoniale et de programmation de la recherche entre institutions demeurent encore trop souvent superficielles, s'exprimant surtout à des échelles individuelles et/ou de manière hétérogène sur le territoire. Une réflexion sur les liens, partenariats, échanges à tisser entre le CNRS et les différents acteurs devrait aussi être mise en place. L'amorce d'une réflexion commune sur la gestion, la valorisation et l'étude des collections et des archives entre MC, CNRS, INRAP, etc., apparaît en outre essentielle. L'heure est bien à la co-construction de synergies dès la phase de terrain, ce qui nécessite l'établissement de modes d'échanges plus formalisés pour résister intelligemment aux lois actuelles sur la concurrence.

Si la recherche française doit «tenir son rang» dans les problématiques largement internationalisées, il est également impératif que les spécificités historiques de la recherche nationale soient soutenues. En regard de la suractivité de l'archéologie préventive, en particulier pour les périodes récentes, le peu de chercheur.e.s en poste au CNRS sur ces périodes devient préoccupant. Il convient aussi de développer l'étude globale des sites préhistoriques, en favorisant les monographies de sites à l'issue de toute opération de terrain. Il s'agit d'un enjeu de politique scientifique, patrimoniale et éditoriale majeur qui mériterait d'être mieux soutenu dans l'avenir.

Les fouilles programmées restent primordiales, d'abord pour l'archéologie à l'étranger, pour l'acquisition de données primaires et la possibilité de tester les modèles, éprouver les données et les développements méthodologiques. Ce sont aussi à la fois des lieux irremplaçables de formation et de transmission des connaissances, et des creusets interdisciplinaires permettant l'élaboration d'approches modélisatrices innovantes dans des contextes maîtrisés. Soutiens financiers spécifiques et recrutements d'archéologues en capacité de mener ces travaux interdisciplinaires de grande envergure doivent être reconnus comme indispensables et effectivement mis en œuvre. De grandes disparités de financement liées aux politiques régionales s'accordent mal avec une programmation de la recherche archéologique à ambition nationale. La question est similaire à l'échelle internationale et l'appui du CNRS est tout à fait indispensable dans le cadre d'une synergie largement perfectible avec le MEAE.

L'ensemble des chercheurs de la section a été questionné sur son implication *archéologique sur des terrains à l'étranger* (fouille, enseignement/formation, expertise, activité muséale ou exposition). Sur l'ensemble des personnes interrogées, 66,8% ont répondu à l'enquête, 21,8% indiquant n'avoir aucune implication (direction/co-direction/participation) à une *action archéologique à l'étranger*.

Deux-cent-trois programmes archéologiques concernent 91 chercheur.e.s (74,3% dans plusieurs programmes). La parité est presque respectée puisque les programmes sont portés à 52,2% par des femmes. Le taux de participation est de 58,1% (dont 53,4% de femme), celui de co-direction, de 27,6% (dont 58,6% de femme), et de direction 14,3% (dont 46,4% de femme). Le rôle des femmes est majoritaire pour la participation et la co-direction, et minoritaire pour la direction.

À noter que 15,8% des actions archéologiques à l'étranger ne porte pas directement sur le terrain mais qu'en revanche l'expertise concerne 91,6% des programmes, l'enseignement ou la formation 25,2%, l'action muséale

ou les expositions 7,4% et, seulement 4% recouvre l'ensemble des quatre types d'action.

Les thématiques abordées très variées concernant l'archéologie ont été regroupées suivant les catégories définissant la section : anthropologie (16,8%) ; géo-archéologie/ géochronologie (19,3%) ; bio-archéologie (22,3%) ; archéologie culturelle (41,6%).

La répartition géographique (figure 5) des projets portés par les chercheur.e.s de la sec-

tion 31 montre un large spectre avec deux pics : le pourtour méditerranéen et le Moyen-Orient, un déficit très net pour l'Afrique centrale ou occidentale et une absence totale en Australie. En ce qui concerne l'éventail chronologique le Paléolithique et le Néolithique, qui constituent la spécificité de la section, sont les plus représentés. Un déficit important apparaît pour le Mésolithique et l'Âge du Bronze. La participation non négligeable pour les périodes historiques est principalement liée à l'archéologie américaine.

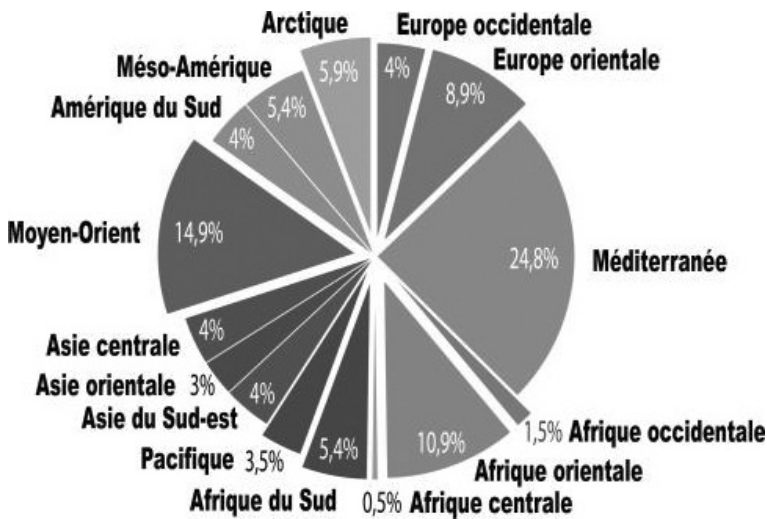


Figure 5 : L'archéologie à l'étranger.

Enfin, il convient de noter que 27 membres de la section 31 dirigent une des 159 missions soutenues par la commission des fouilles archéologiques du Ministère de l'Europe et des Affaires Étrangères et que, 8 dispositifs du CNRS contribuent au soutien de l'*archéologie à l'étranger* : 3 LIA, 3 GDRI, 1 PRC et 1 PICS (essentiellement sur l'Europe et le Paléolithique).

2. Bilan pluriannuel des recrutements CNRS en termes de thématiques et de méthodes de recherche

Au cours des cinq dernières années, la section 31 a recruté 11 chercheur.e.s dont 5 spé-

cialistes du Paléolithique (Pal. Inf., 1 ; Pal. Moyen, 3 ; Pal. Sup, 1), 2 mésolithiciens et 4 néolithiciens. Il s'agit de 2 tracéologues, 3 spécialistes de la céramique, 5 technologues (4 « industries lithiques » 1 « matières dures animales » et 1 « colorants »).

3. Thématiques émergentes ou déclinantes, à développer ou à soutenir

À l'échelle européenne, le Paléolithique moyen et la transition avec le Paléolithique supérieur et le Tardiglaciaire sont des périodes qui ont bénéficié de recrutements ces quinze dernières années. Il est important de maintenir

cette dynamique qui a permis la création de collectifs de recherche solides, et de l'étendre à d'autres segments chronologiques (ex : Paléolithique supérieur moyen et DMG, Mésolithique) pour lesquelles de tels collectifs ne sont pas encore solidement établis. Les recherches sur l'art pariétal et mobilier et plus généralement sur les expressions symboliques, historiquement l'un des fers de lance de la Préhistoire française, souffrent d'un renouvellement insuffisant.

L'adaptation des groupes humains aux contextes environnementaux (ex : gestion des ressources du milieu en eau, sols, ressources minérales, animales, ligneuses) ; les rythmes et étapes des processus évolutifs (ex : asynchronie des innovations techniques selon le mobilier étudié) ; le positionnement cognitif de l'homme dans son milieu ; les transitions, les transmissions et les interactions entre groupes frontaliers ; la géographie culturelle des territoires et les migrations humaines (modélisations paléoclimatiques/ culturelles) ou encore la construction/déconstruction du savoir en archéologie préhistorique sont des thématiques en développement qui mobilisent des approches interdisciplinaires, empruntant aux sciences des matériaux (géochimie, géophysique, etc.), aux sciences sociales (anthropologie sociale, sociologie, etc.) ou encore à l'imagerie 3D et au SIG.

Concernant la Protohistoire des sociétés agro-pastorales de l'Ancien Monde et les processus culturels holocènes complexes dans les Amériques ont émergé des études sur les mobilités et les processus de peuplement, les dynamiques d'occupation des sols, l'archéologie des estrans, la fonction des sites, l'architecture et les matériaux de construction ou l'étude des matériaux en profitant de développement en imagerie 3D à haute résolution/multi-échelle, spectroscopie, biogéochimie, tracéologie, taphonomie, et modélisation/simulation. Si la technologie culturelle doit être soutenue à son rang international, un soutien particulier doit porter sur les approches, ethnoarchéologiques (référentiel actualiste), archéo-métallurgiques, la tracéologie, l'archéologie des estrans et des montagnes. Le Mésolithique et les Âges des

Métaux restent des domaines en sous effectifs alarmants. Ces périodes clés pour comprendre les premières sociétés urbaines ou les phénomènes de complexité sociale, connaissent par ailleurs un déclin dans la recherche universitaire sur l'ensemble de leurs terrains européens ou extra-européens (surtout les âges des métaux). Comme déjà pointé lors du dernier rapport, les archéologies andine, amazonienne océanienne, africaine, proche et moyenne orientales ont été fragilisées par le non remplacement de départs à la retraite sans que d'autres organismes de recherche ne prennent le relais. Dans de nombreuses régions du monde, la présence française se maintient grâce à des expertises très spécifiques et quelques culturalistes généralistes. Plus généralement, on ne peut que s'inquiéter du désengagement progressif du MEAE concernant les missions archéologiques françaises.

Le CNRS doit appuyer les nouveaux développements méthodologiques autour des analyses des chaînes opératoires lithiques, osseuses ou céramiques, que ce soit en amont par les approches structurales des matériaux ou en aval par les analyses fonctionnelles. Si les démarches modélisatrices (scénarios culturels et modèles prédictifs) sont bien en phase d'expansion en archéologie, le CNRS doit soutenir le développement de bases de données à large échelle et leur modalité de diffusion et d'interopérabilité, tout comme il doit assurer le développement et la promotion d'outils statistiques pour des modélisations mieux contrôlées par les données de l'archéologie.

L'interdisciplinarité reste un enjeu majeur des recherches menées au CNRS, mais elle peut handicaper le profil des jeunes chercheurs par effet dispersif. Le découpage chronologique fait sens pour certaines disciplines mais peut rendre difficile le positionnement de travaux qui s'appuient sur des méthodes empruntées aux sciences expérimentales ou physiques, appliqués aux périodes antiques ou historiques, et qui trouvent difficilement leur place en section 32 et sont hors-champs chronologiques dans la section 31.

D. Bio-archéologie

La bio-archéologie, bien qu'appartenant au champ des études culturalistes, fait ici l'objet d'un développement spécifique afin de montrer, aussi finement que possible, la répartition des forces au sein de la section.

1. Positionnement institutionnel

La section 31 comprend 37 chercheur.e.s paléontologues/archéozoologues dont le champ chronologique s'étend du Plio-Pléistocène aux périodes historiques : Plio-Pléistocène (3), Paléolithique inférieur/moyen (10), Paléolithique supérieur (7), Mésolithique (2), Néolithique (7), Protohistoire (1), Périodes préhispaniques (2), Antiquité (1), Moyen Âge (1). Les objets d'étude sont principalement les restes de grands mammifères (24 dont 2 spécialistes des carnivores et 1 de la mésofaune), viennent ensuite la microfaune (3), l'ichtyofaune (2), l'avifaune (2) et la malacofaune (1 + 2 autres chercheur.e.s tournés vers des questionnements d'ordre paléoenvironnemental non décomptés dans les 36). La plupart des chercheur.e.s sont généralistes mais la section comprend aussi des spécialistes en cémento-chronologie (2), en biogéochimie isotopique (3), en morphométrie géométrique (2) et en datation (1). Deux chercheuses sont spécialistes de l'ADN ancien sur restes animaux (et humains).

Au CNRS, la section 31 constitue un des piliers de la communauté des paléontologues et le socle des archéozoologues (4 archéozoologues en section 32, spécialistes des périodes protohistoriques et historiques). Les études sur l'ADN ancien sont à l'interface des sections 31 et 29 (1 chercheur spécialiste de l'ADN ancien) tandis que la CID 52 recrute plutôt des profils de paléoenvironnementalistes. La géochimie isotopique est présente dans la section 18 (1 chercheur). Dans le paysage national, le CNRS est le principal point d'ancrage de la discipline qui compte aussi 16 enseignant.e.s-chercheur.e.s dont la majeure partie est ratta-

chée au MNHN, 19 agent.e.s de l'INRAP, 4 agent.e.s de services archéologiques territoriaux et 1 conservatrice.

Seul.e.s 11 chercheur.e.s en archéobotanique malgré 2 nouveaux recrutements en 2015 et 2017 sont présents en section 31 soit 1(+ 1 IE) dendrochronologues, 1 xylologue, 3 (+ 1 IR) carpologues, 6) dont 1 spécialiste en phytolithes et 2 départs à la retraite d'ici 2024) anthracologues, et 5 ITA (AI et IE) en appui à la recherche. Si l'anthracologie reste mal représentée, la situation de la carpologie et de la dendro-archéologie sont alarmantes, en particulier pour le début de l'Holocène. Les forces sont réparties dans 5 UMRs (AASPE, CEPAM, Chrono-Environnement, CREAAH, ISEM). Les champs géographiques les mieux couverts sont l'Europe de l'Ouest, le pourtour méditerranéen, le Moyen Orient, le Nord-Est de l'Afrique. Le continent américain se réduit à un poste de MC pour l'Amérique centrale. Les périodes chronologiques vont de la fin du Pléistocène à nos jours. Deux anthracologues et un carpologue ont été recrutés en section 32. Malgré des effectifs faibles, le CNRS reste le principal pourvoyeur de spécialistes puisque seuls 8 postes d'enseignants (2 Professeurs et 3 Maitres de Conférences, universitaires et MNHN) viennent compléter le cortège. Une quinzaine d'agents est répartie entre l'INRAP, les collectivités territoriales, les opérateurs privés et les autoentrepreneurs.

Les recherches en bioarchéologie impliquent le plus souvent des études sur le temps long et couvrent de fait des périodes qui relèvent des sections 31, 32 et 33. Dans les faits, la bioarchéologie relève du périmètre de la 31. Dans la pratique, la section 32 opère également de rares recrutements ciblés de bioarchéologues. Le flou de cette situation nuit aux bioarchéologues des périodes postérieures à la protohistoire qui trouvent plus difficilement leur place dans une section.

La communauté française des bioarchéologues est l'une des plus importantes sur le plan international. Fortement impliquée dans les structures et réseaux internationaux, elle contribue également largement à la formation à la recherche. Le GDR BioArcheoDat constitue

une trame structurante pour les périodes récentes du Paléolithique jusqu'aux périodes historiques mais gagnerait à être élargi à l'ensemble de la communauté afin de décloisonner les pratiques et dégager des perspectives de recherche sur le temps long.

Les référentiels de comparaison sont au cœur de la pratique bioarchéologique et tous les laboratoires de recherche disposent de «thèques» en lien avec les matériaux étudiés. Un soutien administratif et juridique pour le statut des collections (propriétés, usages, conservation, pérennité) devient indispensable du fait du nombre toujours plus faible de personnels en appui à la recherche permettant de les gérer. Les premières phases d'analyse du matériel, ainsi que le tri, nécessiteraient également du personnel technique dédié. Depuis 2011, la création de l'UMS BBEES permet un soutien technique et scientifique aux chercheur.e.s de l'INEE souhaitant structurer, pérenniser ou mutualiser leur travail autour des bases de données de recherche sur la Biodiversité naturelle et culturelle, actuelle et passée. Cet effort devrait servir de modèle et, face à la nécessité de mettre en œuvre des traitements de données de plus en plus complexes, il faudrait l'étendre aux biostatistiques ou encore ériger un service de coordination nationale des référentiels actualistes accessibles à tous via des plates-formes open-source.

Seul un contexte de recherche ancrée au sein d'une institution telle que le CNRS, dont la force est de permettre une recherche à la fois fondamentale, interdisciplinaire et au plus proche du terrain, permettra à la bioarchéologie de développer, sans déconnection avec l'anatomie comparée, de nouvelles approches (géochimie, génétique, morphométrie) et être compétitive face aux appels d'offres nationaux et internationaux.

2. Bilan pluriannuel des recrutements CNRS

Ces 5 dernières années, 6 paléontologues/archéozoologues ont été recrutés au CNRS : 5 en section 31 (1 spécialiste en morphométrie

sur l'Holocène, 3 spécialistes de la grande faune aux profils complémentaires, 1 spécialiste des micromammifères) et 1 spécialiste des micromammifères en CID 52. En archéobotanique, deux nouveaux recrutements viennent renforcer la discipline, l'un en carpologie-anthracologie spécialisé sur le Moyen-Orient et le Nord-Est de l'Afrique et l'autre en anthracologie sur la transition Pléistocène/Holocène. À cela s'ajoute le recrutement d'un carpologue des périodes historiques en section 32 (2019).

3. Enjeux de l'évolution démographique

L'étude des restes fauniques ou végétaux des périodes récentes (Protohistoire et périodes historiques) est peu représentée dans la section 31 et n'est nullement compensée par les chercheur.e.s de la section 32. Dans le paysage national de la recherche, ce sont les structures d'archéologie préventive (INRAP, Collectivités territoriales) qui emploient le plus souvent ces profils de recherche. Pour le Néolithique, à très brève échéance, la réduction drastique d'archéozoologues et d'archéobotanistes dont les compétences premières reposent sur l'anatomie comparée est très inquiétante. La perte de ces connaissances fondamentales est d'autant plus alarmante que le vivier de jeunes chercheur.e.s est très limité au regard des thèses soutenues depuis 2014. D'autres champs disciplinaires comme l'ichtyologie et l'étude des invertébrés marins sont en péril et d'autres restent inexistantes. Si les recrutements récents ont permis de renforcer l'archéozoologie pour le Paléolithique, le Mésolithique doit faire l'objet d'une attention particulière puisque, d'ici 5 ans, il ne restera plus qu'un seul chercheur au CNRS. Les nouvelles approches développées en archéobotanique nécessitent des compétences particulières et induisent de ce fait l'arrivée de nouveaux profils de chercheur.e.s, parfois complètement déconnectés du terrain et du matériel d'étude. Dans le même temps, une perte de compétences alarmante concerne l'archéopalynologie et la carpologie (notamment pour l'Holocène).

4. Thématiques émergentes

En archéozoologie, la reconstitution des biocénoses et leur évolution au fil du temps en lien avec les changements climatiques et l'emprise progressive des humains sur leur milieu a vu un regain d'intérêt ces dernières années avec, pour le Pléistocène et les débuts de l'Holocène, un renouveau méthodologique visant à croiser différents proxies (géochimie isotopique, micro-usures dentaires, morphométrie géométrique, cémento-chronologie) afin de mieux cerner la paléoécologie des populations animales fossiles. L'histoire évolutive des espèces animales est abordée via la morphométrie classique et géométrique. Le développement de ces outils n'est que complémentaire de l'anatomie comparée dont la connaissance se perd. Parallèlement au développement de méthodes de pointe (scléro-chronologie / cémento-chronologie morphométrie géométrique, géochimie isotopique, imagerie 2D et 3D via microscope confocal notamment, méthode shotgun pour l'étude de l'ADN ancien, biostatistiques), de nouvelles thématiques s'étendent : écologie historique, biogéographie et paléoéthologie des espèces animales, modalités de contrôle des populations animales sauvages avant le Néolithique, modélisation des systèmes et de scénarios régionaux, caractérisation biomoléculaire de l'évolution des taxons, ontologie des populations passées par le prisme de leur relation au monde animal et végétal.

L'étude des restes végétaux repose sur une démarche actualiste (collection de référence, ethnologie) et expérimentale (création de référentiels) mais emprunte également à la géochimie isotopique, la morphométrie géométrique, l'ADN ancien, l'intégration de l'écologie fonctionnelle. Ces dernières années voient l'apparition d'approches pluri-méthodologiques (morphométrie/isotopes, dendro-anthracologie/isotopes) avec des problématiques variées (climat, pratiques agraires et sylvicoles) ou encore le développement de la chimie organique pour identifier les substances végétales.

E. Géographie physique et environnementale, paléo-environnements

1. Positionnement institutionnel

Les chercheur.e.s actuellement en poste au CNRS travaillant sur les domaines de la géographie physique, des paléo-environnements, sont au nombre de 31 et affectés à 13 UMRs distinctes. Deux unités accueillent à elles seules 1/3 de ces chercheur.e.s à Paris et à Chambéry. L'accrétion autour de ces unités a renforcé la reconnaissance de compétences à l'international sur les reconstitutions paléo-environnementales ou encore sur les milieux sentinelles des changements climatiques (haute latitude et haute altitude).

Les autres chercheur.e.s sont homogènement répartis entre plusieurs sites scientifiques : Toulouse, Lyon, Clermont-Ferrand, Besançon, Nice, Aix-Marseille, Nantes et Brest où, souvent peu nombreux à relever de la section 31, ils peuvent coopérer avec des chercheur.e.s d'autres sections : section 39 principalement, mais également sections 30, 32 et 18. Ces associations favorisent des démarches interdisciplinaires selon trois principales modalités : (1) une collaboration fructueuse avec des écologues dans l'étude des interactions entre la biosphère et le cycle hydro-sédimentaire ; (2) un investissement dans les études paléo-environnementales et notamment géo-archéologiques avec des chrono-écologues et des géochimistes ; (3) une collaboration pour l'étude, voire la modélisation, des socio-écosystèmes avec des spécialistes de Sciences Humaines et Sociales.

La communauté des géographes physiciens est très ouverte sur l'université. Les chercheur.e.s CNRS sont en effet directement associés à des enseignant.e.s-chercheur.e.s dans leurs unités dans un équilibre vertueux, mais précaire lié à la pénurie de renouvellement des postes. La spécificité des chercheur.e.s CNRS réside tout d'abord dans l'investigation scientifique de terrains lointains, avec des missions de

longue durée, incompatibles avec un calendrier universitaire. Beaucoup de ces terrains se situent en position de sentinelle des changements globaux : Mondes polaires et subpolaires, Himalaya, Cône sud-américain, Proche-Orient et mondes méditerranéens, par exemple. Une autre spécificité des chercheur.e.s est la réalisation de suivis temporels fins et systématiques de processus biophysiques sur un temps pluriannuel, nécessairement chronophages : suivi de l'érosion en domaine fluvial ou littoral, par exemple.

2. Bilan pluriannuel des recrutements

Depuis 2014, soit sur les 5 dernières années, 8 chargé.e.s de recherche ont été recruté.e.s (2 hommes et 6 femmes). Trois d'entre eux travaillent sur des temporalités longues (Pléistocène, Holocène) et développent des analyses multi-proxies, interdisciplinaires, permettant de cerner au plus fin les modalités du déroulement de transitions environnementales passées. Deux travaillent sur des temporalités courtes (de quelques décennies à l'Actuel) en développant des approches météorologiques sur des espaces sensibles fortement exposés aux changements climatiques ou aux activités anthropiques. Ces recrutements ne compensent pas les départs en retraite ni les manques déjà identifiés dans le précédent rapport. Parmi ces manques on relèvera l'étude des milieux karstiques, indispensable à la compréhension des modalités de fréquentation des abris et karsts par les communautés animales ou humaines : elle constitue de fait un enjeu paléoenvironnemental fort, transversal au sein de la section 31.

3. Thématiques émergentes

Parmi les thématiques actuellement émergentes, ressort le développement de méthodes d'investigations pour une lecture affinée des archives sédimentaires, en vue d'une hiérarchisation des processus qui animent les changements environnementaux. Des indicateurs toujours plus spécifiques sont en cours de

développement pour une lecture à haute résolution temporelle de l'évolution des milieux. Des perspectives émergent ainsi sur la reconstitution de la paléo-biodiversité à diverses échelles spatiales, ou encore du paléo-pergélisol. Aux côtés des études portant sur le rôle des facteurs climatiques et anthropiques dans le forçage des systèmes environnementaux, une part croissante des études porte sur la mise en évidence d'une auto-organisation de ces systèmes complexes. Il s'agit alors d'identifier des effets de seuil, des points de bascule, caractéristiques d'une non-linéarité des réponses des systèmes étudiés. La part croissante de travaux à large échelle permet également d'englober des contextes locaux différents et de monter en généralité dans le décryptage des transitions et évolutions du passé.

Aux échelles de temps plus fines, la modélisation de la trajectoire évolutive des socio-écosystèmes prend une nouvelle ampleur. Cette modélisation numérique (géomatique, statistique, simulations multi-agents), nourrie des données de terrain, peut avoir plusieurs objectifs. Le premier est de formaliser le fonctionnement de systèmes complexes. Le second est de tester des hypothèses quant aux processus ayant pu animer les socio-écosystèmes, ce travail peut être mené aussi bien en vue d'une rétro-analyse des fonctionnements passés que dans l'élaboration d'une démarche prospective. La démarche peut alors servir d'aide à la décision dans une logique d'adaptation.

D'une façon générale, le recours toujours plus fréquent aux outils numériques permet dorénavant une approche géographique (territorialisée) des interactions milieux-société et ce à des échelles spatiales fines. En effet, grâce aux outils de la télédétection, de la modélisation, couplés à des mesures *in-situ*, des perspectives s'ouvrent pour enrichir les modèles climatiques et les proxies globaux par des méthodes d'analyse spatiale. Il est alors possible de produire des données affinées, adaptées au contexte spécifique de territoires ciblés, voire de sites.

Sur un plan davantage conceptuel, la communauté cherche à dépasser la lecture des évolutions environnementales à travers le seul

diptyque Homme/Milieu. De façon concrète, il ne s'agit plus de considérer les activités humaines comme un forçage extérieur au système étudié. Il s'agit davantage de les prendre en considération comme un agent à part entière pouvant, par le jeu d'interactions complexes variables dans le temps et dans l'espace, être aussi bien un moteur d'évolution (voire de dégradation) environnementale qu'un gage d'homéostasie.

III. Organisation et pratiques de la recherche

Le développement des projets de recherche à durée de vie courte (de type ANR, DIM, Labex) autorise le financement de programmes pluridisciplinaires à forte valeur ajoutée en matière de coopérations intersectorielles et, plus généralement, d'acquisition et de partage d'équipements scientifiques mi-lourds, notamment pour les SHS. Cependant, se posent les questions du temps consacré au montage et à la gestion de ces projets, du taux de réussite extrêmement faible du fait de l'inadéquation entre les champs des panels d'évaluation et notre interdisciplinarité intrinsèque. Il existe un décalage entre des « offres à rendu immédiat » et le temps long nécessaire à la mise en commun des objets et pratiques de recherche nécessaire dans nos thématiques. La garantie de moyens constants (financiers et en personnels) est entachée par la baisse continue des crédits récurrents des UMRs et de leurs tutelles.

La mise en place de financements complémentaires de petits projets « blancs » (< 15.000 euros) est davantage adaptée à nos disciplines et peut offrir des possibilités nouvelles d'innovation et de planification de la recherche.

Le CNRS doit poursuivre son soutien à la création de plateformes d'ingénieries dédiées à la recherche. Celles-ci, doivent devenir plus autonomes (recrutements, budgets, formations) et être examinées par le Comité national.

Des pôles techniques forts, centralisant diverses compétences (Radiocarbone, ADN, isotopes, statistique, modélisation, etc.) permettraient d'éviter une division des moyens et de favoriser les échanges bilatéraux de compétences. Elles ne doivent toutefois pas remplacer ni se substituer aux pôles techniques de proximité dans les laboratoires. La surenchère compétitive internationale conduit à une production scientifique à obsolescence programmée qui peut poser des problèmes éthiques dans notre pratique de la recherche, si, pour obtenir des financements, il nous faut sans cesse rechercher le sensationnel. Quelle place alors pour une recherche moins sensationnaliste, mais tout aussi fondamentale ?

Un soutien du chercheur dans son effort de production de données primaires et de transfert (aides à la traduction, à la communication, etc.) est ainsi indispensable pour garantir leur non-caducité. Il s'agit de maintenir ainsi une recherche de fond à laquelle on doit donner le plus large écho car elle offre un socle pérenne et robuste à toute approche plus théorique qui ne peut venir qu'en seconde intention. Ces données sont naturellement valorisées dans les revues françaises puisqu'en lien direct avec la communauté scientifique concernée en premier lieu. Il est donc essentiel de soutenir les organes de publication existants en les labélisant.

Il est important qu'un soutien accru soit apporté au développement de la « science ouverte » (*open access*). Si ce projet de « science ouverte » est très souhaitable, il doit être conçu sans mettre en péril l'activité de certains modèles éditoriaux expérimentés qui ne vivent que sur la base des abonnements (associations, sociétés savantes).

Conclusion

Par cette contribution au rapport de conjoncture, nous nous alarmons d'un affaiblissement de la recherche publique garante

du bien commun. Attachés à l'établissement pluraliste qu'est le CNRS, nous constatons que les pertes en termes d'emplois scientifiques pérennes (chercheur.e.s, ingénieur.e.s et technicien.ne.s) mettent en péril notre aptitude collective à mener des recherches scientifiques de fond, indépendantes et affranchies d'une quête de sensationnel. Dans les domaines cou-

verts par la section 31, qui permettent de bien comprendre les modalités de l'implantation progressive de l'Homme et la part des transformations de la planète qui lui revient, il est particulièrement urgent d'inverser cette tendance et de permettre au CNRS de répondre aux enjeux environnementaux et sociétaux, comme le demande la société contemporaine.

SECTION 32

MONDES ANCIENS ET MÉDIÉVAUX

Composition de la section

Laurent SCHNEIDER (président de section), Ivan GUERMEUR (secrétaire scientifique), Philippe BARRAL, Marie BOUHAÏK, Matthieu CASSIN, Raphaëlle CHOSSNOT, Rita COMPATANGELO-SOUSSIGNAN, Hélène DEBAX-VIADER, Marie-Laure DERAT, Thomas DESWARTE, Bernard GRATUZE, Jean Oliver GUILHOT, Caroline HEID, Frédéric HURLET, Marie-Christine MARCELLESI, Mohamed OUERFELLI, Marie-Jeanne OURIACHI, Catherine VERNA, Émilie VILLEY, Jean-Baptiste YON*.

Résumé

Les champs d'étude de la section 32 se rapportent aux sciences de l'Antiquité et du Moyen Âge, soit à des cultures et des sociétés complexes disposant de l'écriture ou connues par des sources écrites ; ils concernent particulièrement les grands ensembles disciplinaires – l'histoire, l'archéologie, l'histoire de l'art et la philologie – impliqués dans l'étude des civilisations nées au Moyen-Orient et autour de la Méditerranée, développées en relation avec elles ou à leur contact. L'aire géographique ainsi couverte englobe l'Europe, le Proche et le Moyen Orient, l'Asie et l'Afrique.

Mots clés :

Mondes anciens et médiévaux : archéologie, histoire, philologie, histoire des arts.

Europe, Afrique, Asie, protobistoire, Antiquité, Moyen Âge.

I. Les structures et l'organisation de la recherche

À l'automne 2019, 37 unités sont en rattachement principal à la section 32 comme section principale, soit 20 Unités mixtes de recherche (UMR), 1 Unité propre de recherche (UPR), 10 Unités de service et de recherche (USR), 1 Unité mixte de service (UMS), 2 fédérations de recherche (FR), 1 Groupement de recherche (GDR), 1 Groupement de service (GDS) et 1 Formation de recherche en évolu-

* Anne-Marie TURCAN-VERKEK et Dany BARAUD étaient membre de la section de septembre 2016 à juillet 2018.

tion (FRE). Depuis 2014, une seule UMR est en évolution ce qui traduit une forte stabilité après les étiajes opérés par les regroupements effectués voilà plus d'une décennie.

Le dispositif mis en place rassemble une communauté scientifique et technique de 4 134 agents en effectif global dont près de 45,6% seulement sont des personnels permanents, seuil inquiétant qui avait fait l'objet d'une alerte motivée dans le rapport précédent. Dans ce strict périmètre la part des chercheurs CNRS évalués par la section représente 79% de son effectif. De fait 45 chercheurs sont insérés dans d'autres unités nationales et internationales en rattachement secondaire et interagissent avec une communauté ou des réseaux scientifiques élargis.

Liste des unités

– UPR 841 – Institut de recherche sur l'histoire des textes (IRHT), Paris-Orléans

– UMR 5060 – Institut de recherche sur les archéomatériaux (IRAMAT), Bordeaux-Belfort-Orléans

– UMR 5136 – France méridionale et Espagne (Framespa), Toulouse

– UMR 5138 – Archéométrie et archéologie, Lyon

– UMR 5189 – Histoire et sources des mondes antiques (Hisoma), Lyon

– UMR 5607 – Ausonius : Institut de recherche sur l'Antiquité et le Moyen Âge, Bordeaux

– UMR 5648 – Histoire, Archéologie, littératures des mondes chrétiens et musulmans médiévaux(Ciham), Lyon

– UMR 6273 – Centre Michel de Bouïard (Craham), Caen

– UMR 7041 – Archéologie et Sciences de l'Antiquité (Arscan), Nanterre

– UMR 7044 – Étude des civilisations de l'Antiquité (Archimède), Strasbourg

– UMR 7192 – Proche-Orient, Caucase : langues, archéologies, cultures, Paris

– UMR 7297 – Centre Paul Albert Février – Textes et documents de la Méditerranée antique et médiévale, Aix-en-Provence

– UMR 7298 – Laboratoire d'archéologie médiévale et moderne en Méditerranée (LA3M), Aix-en-Provence

– UMR 7299 – Centre Camille Jullian – Histoire et archéologie de la Méditerranée, Aix-en-Provence

– UMR 7302 – Centre d'études supérieures de la civilisation médiévale (CESCM), Poitiers

– UMR 8164 – Histoire, Archéologie, Littérature des Mondes Anciens (Halma), Lille

– UMR 8167 – Orient et Méditerranée, textes, archéologie, histoire, Ivry-sur-Seine

– UMR 8210 – Anthropologie et Histoire des Mondes Antiques (Anhima), Paris

– UMR 8546 – Archéologie, philologie et histoire d'Orient et d'Occident (Aoroc), Paris

– UMR 8584 – Laboratoire d'Études sur les Monothéismes (LEM), Villejuif

– UMR 8589 – Laboratoire de Médiévisiologie occidentale de Paris (LaMOP), Paris-Villejuif

– USR 3125 – Maison méditerranéenne des sciences de l'homme, Aix-en-Provence

– USR 3133 – Centre Jean Bérard, Naples

– USR 3134 – Centre d'études alexandrines (CEAlex), Alexandrie

– USR 3135 – Institut français du Proche-Orient (IFPO), Beyrouth

– USR 3139 – Institut français de recherche en Iran (IFRI), Téhéran

– USR 3155 – Institut de recherche sur l'architecture antique (IRAA), Aix-en-Provence

– USR 3172 – Centre franco-égyptien d'étude des temples de Karnak (CFEETK)

– USR 3224 – Centre de recherche sur la Conservation (CRC), Paris

– USR 3225 – Maison René Ginouvès, Archéologie et Ethnologie, Nanterre

– USR 3516 – Maison des Sciences de l'Homme de Dijon

- UMS 3657 – Archéovision, Pessac
- FRE 2018 – Mondes iranien et indien, Paris

Liste des fédérations et groupements de recherche

- FR 3383 – Fédération des sciences archéologiques de Bordeaux
- FR 3747 – Maison de l'Orient et de la Méditerranée – Jean Pouilloux
- GDR 2063 – Recyclage et emploi des matériaux de l'architecture aux périodes anciennes
- GDS 3378 – Fédération et ressources sur l'Antiquité (FRANTIQ)

Dans un périmètre élargi et reconfiguré, 24 autres unités ou groupements sont donc en rattachement secondaire à la section 32. Dans ce second ensemble, on dénombre 13 UMR, 6 USR, 1 UPS, 3 GDR et 1 FRE. Les liens privilégiés se font principalement avec les UMR d'archéologie préhistorique de la section 31 et les unités de la section 33. Au moins 27 chercheurs (dont 10 DR) rattachés et évalués par la section 32 sont affectés dans des unités relevant de la section 31, où ils sont parfois majoritaires dans les effectifs des chercheurs CNRS, et 11 autres (dont 4 DR) sont dans des unités rattachées à la section 33. Depuis 2014, 9 chercheurs nouvellement recrutés ont par ailleurs été intégrés dans des unités opérées ou co-opérées par l'InSHS mais relevant des sections 31 (4 cas) ou 33 (5 cas) en premier rattachement.

Paysage et variables du dispositif : une configuration déséquilibrée qui montre néanmoins une adaptation à des reconfigurations permanentes

Parmi les 37 unités ou groupements de recherche de la section, 10 sont concentrées en région parisienne. Elles regroupent 59 % des chercheurs CNRS mais seulement 31 % des effectifs permanents. Dix-sept sont situées en région

sur les sites d'Aix-en-Provence (4 unités), Bordeaux (2), Caen (1), Lille (1), Lyon (3), Poitiers (1), Strasbourg (1), Toulouse (1). Cinq USR sont implantées à l'étranger (Alexandrie, Beyrouth, Louxor, Naples, Téhéran).

Les périmètres, les tailles et la typologie des « briques » que constituent ces unités sont très variables. Dans le cas des UMR et de l'UPR de la section, l'effectif total des « chercheurs et IT permanents » oscille entre 25 et 218, celui des chercheurs CNRS entre 1 et 28. Les médianes respectives sont à 69 et 5, celle des IT CNRS à 6. Le rapport entre le nombre d'IT et le nombre de chercheurs CNRS donne une autre idée de cette typologie complexe. Quatre unités ont un nombre de chercheurs supérieur à celui des IT, 7 autres sont peu ou prou à l'équilibre tandis que pour 11 autres la situation est diamétralement opposée. Dans ce dernier groupe, le pourcentage des IT CNRS dans l'effectif IT varie ainsi de 17 à 100 %. Neuf unités (dont 4 sur un même site) ont un pourcentage d'IT CNRS supérieur à 75 %.

Cette variabilité générale s'explique par plusieurs facteurs : l'histoire propre de chaque laboratoire, les regroupements opérés notamment en région parisienne durant la dernière décennie et la coexistence de plusieurs laboratoires plus spécialisés (par type de sources sollicitées, par expertise chronologique, ou par espace géographique) sur certains sites régionaux comme Aix-en-Provence, Bordeaux et Lyon, ainsi que dans la configuration parisienne, ou encore par le poids des départs divers qui ont pu affecter l'évolution récente de certaines unités. On notera néanmoins que toutes les UMR qui intègrent une composante des sciences de l'archéologie, ont désormais à la fois un ancrage métropolitain ou régional, mais aussi international, qu'il s'agisse de l'espace méditerranéen, du Proche et du Moyen-Orient, de l'Afrique et désormais de l'Asie.

Dans le domaine des sciences historiques et philologiques, on rappellera que la section compte l'une des rares UPR de l'InSHS, tandis qu'une UMR multi-sites permet d'organiser l'archéométrie française, présente sur plusieurs continents, en fonction des appareillages disponibles sur le territoire.

Tableau 1 : Effectif des unités en rattachement principal (d'après Labintel, sept. 2019).

Unités	Chercheurs 32	Autres chercheurs et EC	IT ⁽¹⁾	Total Non-permanents	Total ⁽²⁾
FRE2018 (ex MII)	2	27	3 (4)	18	54 (3)
UMR5060 – Iramat	12	24	25 (36)	62	134
UMR5136 – FRAMESPA	2	112	2 (3)	246	363
UMR5138 -Arar	5	36	10 (19)	21	82 (1)
UMR5189 – Hisoma	10	62	9 (15)	146	235 (2)
UMR5607 – Ausonius	9	45	3 (15)	58	127
UMR5648 – Ciham	6	49	7 (13)	73	142 (1)
UMR6273 – Craham	1	27	6 (27)	79	135 (1)
UMR7041 – Arscan	17	155	15 (36)	593	811 (10)
UMR7044 – Archimede	2	48	6 (24)	100	174
UMR7192 – Proclac	5	32	2 (7)	41	87 (2)
UMR7297 – PAF	2	20	2 (2)	11	36 (1)
UMR7298 – LA3M	3	13	11 (12)	83	113 (2)
UMR7299 – CCJ	12	49	20 (20)	22	108 (5)
UMR7302 – CESCO	1	26	3 (15)	47	89
UMR8164 – Halma-Ipel	2	82	4 (23)	43	150
UMR8167 – O&M	28	109	21 (25)	309	475 (4)
UMR8210 – Anhima	4	58	6 (9)	98	169 (2)
UMR8546 – Aoroc	11	17	12 (13)	7	52 (4)
UMR8584 – Lem	1	48	4 (5)	86	141 (1)
UMR8589 – Lamop	8	26	3 (3)	54	91 (1)
UPR841 – IRHT	22	13	30 (30)	22	94 (7)
USR 3125 –MMSH	0	1	21 (28)	1	29
USR 3133 – CJB Naples	2	2	2 (7)	0	11
USR 3134 – CÉAlex	2	0	7 (7)	3	12
USR 3135 –IFPO	2	12	6 (34)	31	79
USR 3139 – IFRI	0	3	0	0	3
USR3155-IRAA	2	10	8 (10)	7	30 (1)
USR 3172 – (CFEETK)	1	0	5 (5)	0	6
USR 3224 -CRC	1	10	6 (35)	12	58
USR 3225 – MAE	0	2	33 (42)	9	53
USR 3516 –MSH Dijon	0	2	14 (28)	12	42
UMS 3657- Archéovis ^o	0	1	3 (6)	4	11

(1) Le premier nombre est celui des IT CNRS, celui entre parenthèse correspond au total des IT CNRS et non CNRS.

(2) Le chiffre entre parenthèse indique le nombre de chercheurs émérites qui ne sont pas comptabilisés dans la colonne « Chercheurs 32 ».

Dresser, dans ce canevas complexe, une typologie des UMR à l'échelle d'une seule section n'est guère envisageable car les articulations scientifiques se tissent dans un périmètre plus large. On précisera toutefois que 3 unités ont moins d'un tiers de personnels permanents, 12 autres se situent dans le tiers suivant, 7 seulement dans le dernier tiers.

On peut néanmoins envisager le dynamisme et le positionnement de ces unités à

partir de données mieux maîtrisées par la section, comme celles des concours. Ainsi, le choix du premier vœu d'affectation des candidats aux concours CRCN (et CR2/CR1 pour l'année 2017) de ces trois dernières années (2017-19) met en lumière d'autres tendances révélatrices de comportements ou d'attentes scientifiques qui s'insèrent dans un dispositif plus large que le seul critère de rattachement principal de telle ou telle unité à la section 32.

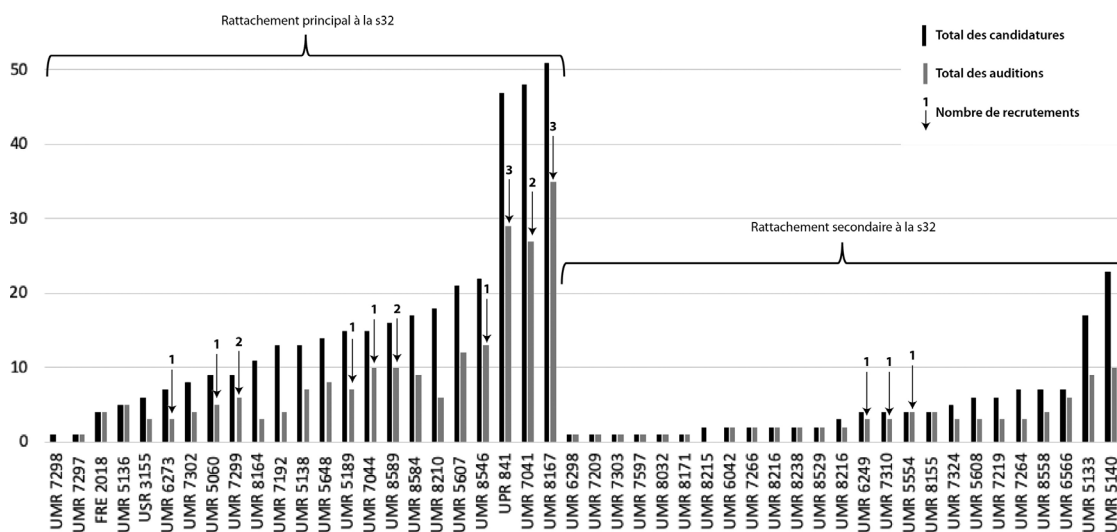


Figure 1 : Total des candidatures et des auditions par unité (concours 2017-2019).

– Sans surprise, en terme d'attractivité, les candidats privilégient les trois plus grosses unités de la section (Arscan, O&M, Irht) qui sont aussi les plus généralistes et organisées souvent en « équipes », plutôt qu'en axes ou thèmes transversaux. Ce sont les seules qui attirent plus de 15 candidatures annuelles avec des scores pour les admis à poursuivre qui se situent entre 56 et 69 %.

– La moyenne tombe ensuite en dessous de 8 candidatures annuelles et se situe dans une tranche comprise entre 5 et 8 candidatures. Cinq autres unités, dont deux sont en rattachement secondaire à la section, et à nouveau des UMR d'archéologie (ASM à Montpellier et ArchéOrient à Lyon) sont dans ce groupe.

Parmi les trois unités de la section qui attirent plus de 6 candidats annuels, deux sont à nouveau parisiennes (Aoroc et Anhima) et une seule est en région (Ausonius à Bordeaux). En revanche dans cette tranche, le taux des admis à poursuivre est plus hétérogène et s'échelonne entre 33 et 67 %.

– Dans un troisième groupe se trouvent les unités plus nombreuses (11) qui ont fait l'objet de 2 à 5 candidatures annuellement. Une seule (Cepam à Nice) est en rattachement secondaire et concerne à nouveau le domaine des sciences archéologiques. Six unités seulement dépassent 3 candidatures annuelles (à Lyon, Strasbourg, Lille, Paris), les neuf autres demeurant dans la partie inférieure de la tranche. Là

encore la fourchette du pourcentage des admis à poursuivre est très large (de 27 à 87 %), mais pour 5 unités, les taux sont supérieurs à 50 %.

– Enfin le dernier groupe rassemble les unités pour lesquelles le nombre de candidatures annuelles est égal ou inférieur à 2. Vingt-deux unités sont dans cette situation, dont 5 seulement relèvent de la section 32. Les autres ressortissent aux sections 29 (1), 30 (1), 31 (6), 33 (6), 34 (1), 35 (2), 38 (2), 39 (1). Les interfaces se font donc de manière privilégiée avec les sections 31 et 33, principalement par l'intermédiaire des sciences archéologiques mais aussi, dans le cas de la section 33, par les études aréales des domaines africains et asiatiques. Dans une moindre mesure, les autres liens s'établissent avec les sections 35 et 38 par la Philologie et l'Histoire de l'art notamment. Toutes les unités ici prises en compte ont eu des candidats qui ont été auditionnés. Dans ce dernier groupe, le taux moyen des personnes auditionnées ayant candidaté sur des unités de la section est de 59 % et celui des candidats se présentant sur des unités en rattachement secondaire ou autres est de 81 %, ce qui traduit l'attention que la section porte aux interfaces.

Promotion des DR

La promotion par concours vers le grade de directeur de recherche 2^e classe conditionnée à des HDR inégalement constituées selon les traditions disciplinaires, les universités, voire les instituts du CNRS est une autre variable qui permet de mesurer l'activité scientifique des unités dans le cadre de la section 32.

Depuis 2012, 39 chercheurs ont été lauréats du concours DR de la section 32. Ceux-ci sont ventilés dans 23 unités dont 6 sont en rattachement secondaire à la section tandis que 9 UMR de la section n'enregistrent pas de promotion. Parmi ces 39 chercheurs, depuis 2012, une seule lauréate a été promue DR1 tandis que 8 autres ont été candidats, que 3 sont aujourd'hui en retraite et deux autres en délégation longue durée dans d'autres établissements. Trois autres promus enfin, ont changé de laboratoire dans les trois ans qui ont suivi leur changement de grade.

II. Les personnels de la recherche

Les chercheurs de la section 32

Évolution démographique : une érosion continue

En septembre 2019, la section comptait 213 chercheurs actifs (148 CR et 65 DR), soit 18 de moins qu'en 2014. Cette diminution continue et linéaire était annoncée dans le rapport précédent. On rappellera que l'effectif des chercheurs de la section était de 285 en 2002 !

De fait, la composition générale de la section a changé ces dernières années. Le rajeunissement constaté depuis 2014 se confirme. La médiane qui était de 54 ans en 2006 est passée à 51 ans en 2014 et se situe désormais à 49 ans. Celle des femmes (49 % de l'effectif) se situe à 47 ans. Les départs en retraite massifs de ces dernières années, mais aussi les départs, trop négligés, vers d'autres établissements nationaux ou étrangers ont fait émerger une autre problématique, la diminution de l'effectif des directeurs de recherche. Avec 65 directeurs aujourd'hui, contre 91 en 2014, le ratio est désormais de 1 DR pour 2,8 CR alors qu'il était de 1,5 en 2014.

Plus globalement, si certaines unités (8) ont connu une sensible amélioration avec un gain – par recrutement ou mutation – de 1 à 5 postes chercheurs (médiane à 1,5) depuis 2014, 14 sont restées stables et 11 ont connu une baisse de 1 à 5 postes (médiane à 1). Le déficit est de 4 postes dans les sections directement rattachées à la section 32, ce qui signifie que les départs ont été plus massifs dans les rattachements secondaires.

Un rapport hommes-femmes plus équilibré

Le rapport hommes-femmes est désormais peu ou prou équilibré : 51,2 % d'hommes et

48,8% de femmes. L'amélioration est nettement plus sensible dans les grades du corps des directeurs de recherche : deux des trois DRCE de la section sont des femmes, 59% des DR1 sont des hommes mais 54,8% des DR2 sont désormais des femmes et celles-ci sont en moyenne plus jeunes que les hommes. Neuf femmes DR2 ont moins de 50 ans tandis que trois hommes sont dans la même situation. Globalement le corps des directeurs de recherche comprend désormais 50,75% d'hommes et 49,25% de femmes.

Situation des ITA

En septembre 2019, le nombre d'IT dans les unités ayant pour rattachement principal la section 32 s'élève à 316 pour les personnels CNRS, 558 pour tous les personnels

On dénombre par ailleurs 74 IR et 49 IE CNRS, soit 123 agents qui sont en prise directe avec la recherche et consolident des métiers et des savoir-faire précieux dans, au moins, trois grands domaines : 1. les humanités numériques, l'édition et l'analyse des sources qui nécessitent la maîtrise de langues anciennes et rares mais aussi de nouvelles technologies ; 2. l'édition scientifique, avec l'objectif de diffuser les résultats de la recherche et d'articuler de façon réfléchie les formats traditionnels (livres et revues) avec les versions électroniques ; 3. les sciences et les métiers de l'archéologie où les IR et IE œuvrent souvent sur le terrain et conservent surtout les formations et les savoirs tout particulièrement en matière de céramologie, de datation, d'architecture, de topographie et de cartographie.

Recrutements et affectation des chercheurs

La section prend en compte ici un bilan qui s'échelonne sur six ans : les trois dernières années de la mandature précédente (2014-16) et les trois premières années du mandat actuel (2017-2019, désormais passé à cinq ans). On rappellera que face aux départs massifs, le nombre des recrutements CR – quoiqu'insuffisant – a néanmoins augmenté à partir de 2010. Il est passé de 14 recrutements entre 2006 et 2009 à 31 entre 2010 et 2013, puis 31 entre 2014 et 2017 et a été de 15 ces deux dernières années. L'année 2017 a été néanmoins marquée par une rupture dans l'effort réalisé et a, de fait, accentué l'érosion de l'effectif global. La section, on l'a dit, perd 18 postes depuis 2014 et ce chiffre serait aggravé si l'on ne comptait pas l'intégration de chercheurs en CDI, les changements de sections et les accueils en délégation. Malgré cela, ce sont donc 46 chercheurs qui ont été recrutés en 6 ans et ceux-ci représentent désormais 21,6% de l'effectif global de la section ; ils contribuent à en changer la tonalité. Si l'on se place sur le terrain académique, la période 2014-16 reste marquée par des recrutements qui concernent essentiellement les mondes antiques anciens et classiques (19 recrutements contre 7 seulement pour les mondes médiévaux), rapport atténué entre 2017 et 2019 (11 contre 9). Toutefois, cette approche traditionnelle fondée sur la chronologie n'est plus vraiment opérante dans la mesure où, d'une part, les aires culturelles se sont dilatées avec des ouvertures vers l'Asie centrale et orientale et l'Afrique subsaharienne et que, d'autre part les sciences de l'archéologie, notamment celles qui portent sur les archéo-matériaux, sont souvent diachroniques.

Tableau 2 : Répartition des CR recrutés de 2014 à 2019 par champ disciplinaire.

4	Épigraphie, philologie, musicologie grecques	3	Histoire byzantine et des chrétiens d'Orient
1	Archéologie punique	2	Patristique et études augustinienes
4	Histoire, archéologie, épigraphie du Proche-Orient ancien, dont Arabie	1	Prédication médiévale et humanités numériques
4	Égypte ancienne et ptolémaïque	4	Histoire de l'Islam médiéval
4	Archéologie des mondes anciens : Asie centrale et orientale dont Chine pré-moderne	2	Histoire de l'Afrique, de l'Orient et de l'Égypte médiévale
3	Protohistoire européenne (numismatique, épigraphie, archéologie)	2	Histoire de l'Occident médiéval
1	Archéologie et anthropologie de l'Occident grec	1	Archéométrie médiévale, histoire des matériaux
4	Archéologie de l'occident romain	1	Archéologie du monde himalayen
1	Histoire, droit romain (risques et ressources)	3	Archéologie, bioarchéologie et numismatique de l'Occident médiéval
1	Archéologie de l'Afrique sub-saharienne ancienne (monde méroïtique)		
27	Mondes anciens	19	Mondes médiévaux

Paysages des affectations par unités

Seules 3 unités ont obtenu plus de trois recrutements ces six dernières années (de 4 à 6), ce qui traduit la tension quotidienne qui affecte la vie des laboratoires. Deux sont parisiennes et comptent parmi les plus gros laboratoires de la section, mais la troisième est en région (Hisoma à Lyon). Neuf autres, dont 5 sont en régions (et une en rattachement principal à la section 31) ont eu 2 à 3 postes. Enfin 9 unités (dont 3 sont également rattachées à la section 33, 1 à la section 31 et une autre à la section 29) n'ont bénéficié que d'un seul recrutement. Sept de ces unités sont en régions. Dans une configuration où les périmètres universitaires sont particulièrement évolutifs, il n'est pas aisé d'établir un tableau par « site ». On se contentera ici de signaler, au-delà de la configuration parisienne qui est la plus complexe, que 10 recrutements ont été effectués à Lyon, 5 à Aix-en-Provence et 4 à Bordeaux, c'est-à-dire dans les métropoles qui disposent de 2 à 4 UMR liées à la section par un rattachement principal ou secondaire. Dans les autres pôles qui ne sont dotés que d'une seule UMR, Besançon, Caen et Strasbourg émergent avec 1 poste. En revanche, 6 UMR en rattachement

principal à la S.32 n'ont pas obtenu de recrutement ces six dernières années : Framespa et ArAr depuis 2002, Proclac depuis 2008, LA3M depuis 2013, CESC et Anhima depuis 2011.

Coloriages et grands domaines : une équation difficile entre stratégie scientifique, menace démographique sur les disciplines et réalité du vivier des docteurs

Les coloriages qui résultent de la stratégie scientifique de l'institut et des demandes de moyen des unités sont toujours complexes à gérer, notamment lorsqu'ils atteignent ou dépassent plus de 50 % des postes ouverts. Les difficultés tiennent pour l'essentiel à la courte période qui sépare la publication des postes du dépôt des candidatures, parfois aussi à l'inadéquation des demandes avec la réalité du vivier des docteurs. La fusion des corps CR2/CR1 atténue cependant ces difficultés mais ne les lève pas toutes. Sur les 46 postes mis au concours entre 2014 et 2019, 35 % ont été coloriés (16 postes) et 81 % de ces coloriages ont été pourvus à ce jour.

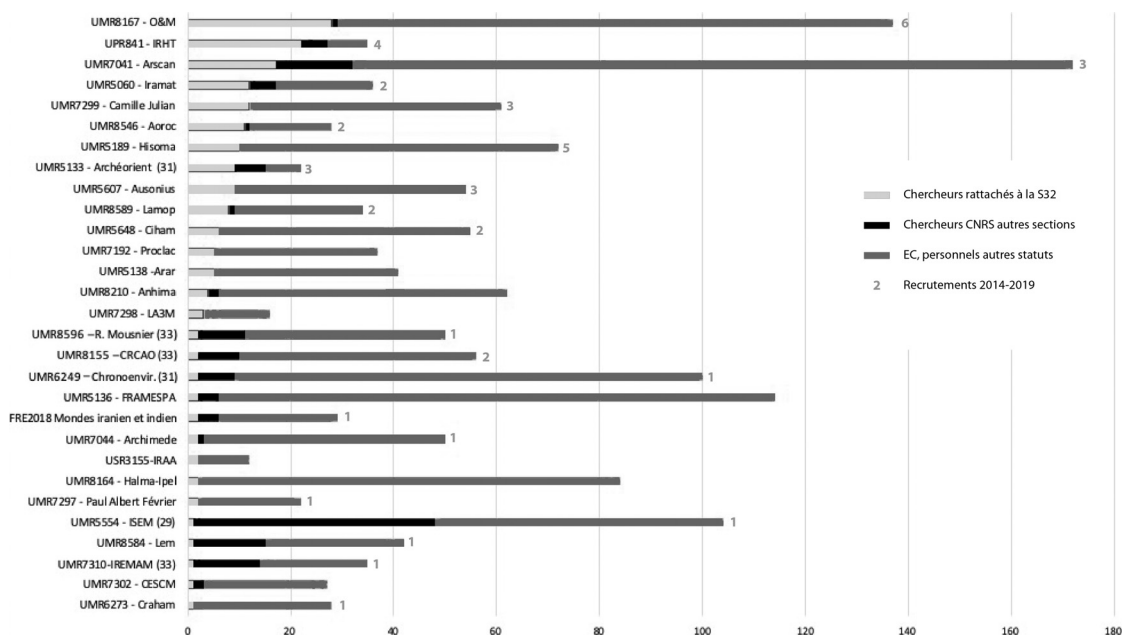


Figure 2 : Affections des CR s.32 recrutés entre 2014 et 2019 rapportées au nombre de chercheurs de la section 32 dans les unités.

NB : les chercheurs émérites ne sont pas comptabilisés

Les colorriages qui fonctionnent le mieux sont ceux qui s'inscrivent dans le domaine des études aréales, dont celles, anciennes, des aires culturelles internes aux mondes méditerranéens antiques et médiévaux. Certains ont pu faire émerger un vivier qui, en accord avec la section 33, a consolidé les ouvertures souhaitées vers l'Asie centrale et orientale d'une part, et l'Afrique subsaharienne d'autre part (Chine, Inde orientale, Ouzbékistan, Pakistan, Ethiopie, Soudan), sinon vers la péninsule arabique. De fait l'internationalisation des communautés scientifiques de la S.32 reste très forte, avec une présence dans de nombreuses régions du monde qui permet une production et une exploitation de nouvelles données primaires. Ainsi, avec 17 recrutements, l'ancrage plus traditionnel en Méditerranée orientale et au Moyen Orient dans les mondes anciens méditerranéens grecs, pu-

niques, égéens, égyptiens, perses et mésopotamiens reste fort, même s'il est insuffisant au regard des besoins, des départs en retraite et des demandes des unités.

À l'inverse, lorsque les colorriages sont trop transversaux et s'appuient davantage sur des méthodologies (quantitatives, modélisation, mathématisation...), qu'ils ne sont pas confortés par une assise historique exigeante, ils deviennent moins opérants.

Un contre-effet des colorriages à visée internationale est aussi le risque d'affaiblir l'ancrage CNRS au sein de l'archéologie hexagonale, alors que le dispositif existant, bien que fragilisé par la vague des départs en retraite, montre une capacité de réponse et d'adaptation rapide à des enjeux sociétaux liés à des catastrophes, comme le cas de Notre-Dame de Paris est venu le montrer.

III. Champs et tendances de la recherche

Proche et Moyen-Orient anciens : Archéologie & Philologie (cunéiforme, ouest-sémitique, grecque & latine)

Pour l'histoire et l'archéologie du Proche-Orient, les problèmes d'accès au terrain sont cruciaux. Ils n'ont pas empêché la poursuite des travaux, avec parfois des glissements géographiques (vers l'Arabie, l'Asie Centrale parfois ou encore le Caucase et le Kurdistan). Les recrutements sont au total peu nombreux, aussi bien à l'Université qu'au CNRS ou à l'EPHE, mais pas totalement absents.

Du point de vue thématique, les recrutements récents ont néanmoins plutôt concerné les textes, principalement en cunéiforme akkadien pour lesquels le travail reste possible en musée, alors que les archéologues de terrain se raréfient. Toutefois, de nombreux domaines linguistiques (hittite, élamite, araméen [non syriaque], phénicien) sont représentés au mieux par seulement un ou deux chercheurs en activité.

Parmi les domaines en difficulté, on citera l'archéologie et l'histoire du Levant au sens large, malgré un recrutement Chypre/monde phénicien (2018). Certes, les candidats sont peu nombreux, ce qui s'explique aussi par la rareté de l'offre de formation dans les domaines plus linguistiques, mais on notera qu'ils sont assez souvent étrangers. Pour l'archéologie de terrain de ces régions, pourtant enseignée dans plusieurs universités et écoles, la dernière période de recrutement au CNRS remonte à la fin des années 2000. Le seul recrutement CNRS (depuis 2014) concerne une zone périphérique (Caucase); les périodes plus récentes sont également peu représentées (voir aussi les rapports sur le monde gréco-romain). En cas de réou-

verture des terrains (Iraq en cours, Syrie?), il sera difficile de maintenir les positions historiques de la France dans ces domaines. D'une manière générale, les disciplines rares sont bien souvent en voie de disparition et ne survivent parfois que grâce aux travaux de retraités, émérites ou honoraires.

Égypte : Archéologie & Philologie (pharaonique, grecque & copte)

Comme dans l'ensemble du Proche-Orient, l'Égypte a vu plusieurs cultures se succéder ou cohabiter au cours de son histoire plurimillénaire, la civilisation pharaonique qui s'est développée entre le 4^e millénaire avant notre ère et la fin du paganisme, bien entendu, mais également les cultures hellénisées qui, surtout à compter du IV^e siècle avant notre ère, ont joué un rôle considérable dans l'ensemble du pays et à Alexandrie, jusqu'à la christianisation et finalement la conquête arabe à la fin de l'Antiquité tardive (642). Les conditions naturelles et le nombre croissant des activités archéologiques produisent donc des données considérables dans ces différents champs disciplinaires : égyptologie (archéologie & philologie), archéologie gréco-romaine, papyrologie et épigraphie grecques, coptologie, christianismes orientaux. Ces dernières années, le domaine de l'édition des textes égyptiens (hiéroglyphiques et hiératiques), traditionnellement bien représenté au CNRS, a connu une chute notable de ses effectifs (depuis 2015, départs à la retraite ou départ du CNRS vers d'autres institutions de 7 chercheurs; et plusieurs autres départs programmés dans les quatre années qui viennent) que le recrutement récent d'une chercheuse (2019) n'a pas compensé, or dans ce domaine la documentation inédite conservée dans les musées ou produite par les activités de terrain est colossale. On notera que les études démotiques, longtemps très faiblement représentées au CNRS comme dans les universités ont bénéficié, depuis 2012, de l'arrivée de nouveaux chercheurs (actuellement 2 CRCN et 1 DR2).

Au cours de la période 2012-2016, des recrutements ont eu lieu dans les domaines de l'archéologie (2012, 2015), de la numismatique (2013) et de la musique (2016). Du point de vue de la papyrologie et de l'épigraphie grecques, comme de la coptologie, malgré un recrutement en 2015 (papyrologies grecque et démotique) et un autre en 2017 (papyrologies grecque, copte et arabe), le déficit est inquiétant, d'autant plus que des départs à la retraite vont considérablement fragiliser ces domaines traditionnels du CNRS, par ailleurs quasiment inexistant dans les universités françaises (uniquement Strasbourg, Collège de France et EPHE).

Si les circonstances politiques et sécuritaires interdisent désormais l'accès à certains terrains (Sinaï et désert occidental en particulier), l'activité s'est reportée sur les sites de la Vallée, du Delta et les grands centres traditionnels (Louxor, Saqqarah, Alexandrie) où le CNRS dispose aussi de missions permanentes (Karnak et Alexandrie).

On relèvera que l'étude du Soudan ancien, domaine sinistré au CNRS depuis le départ à la retraite des derniers spécialistes, a bénéficié du recrutement d'un chercheur en 2018.

Pour toutes ces disciplines et domaines, rares ou inexistant dans les universités, le CNRS a toujours été le moteur de leur développement, de leur dynamisme et de leur renouvellement, ce qu'il conviendrait qu'il puisse demeurer dans le futur.

Mondes antiques gréco-romains

Dans ce vaste champ disciplinaire, le dispositif de la section 32 vient en complémentarité des 403 postes dans les universités et les établissements d'enseignement supérieur. Les recrutements à l'université dans le domaine de l'Antiquité grecque se sont néanmoins considérablement raréfiés ces dernières années. Alors qu'il y a une dizaine d'années, cela concernait principalement la langue et la philologie, la pénurie de postes s'est étendue récemment à l'histoire et à l'archéologie. Dans

le domaine de la Grèce antique, les périodes hautes (II^e millénaire et début du I^{er} millénaire, époque archaïque) sont de moins en moins représentées. Au delà des traditionnelles études de monuments désormais mieux intégrés dans le tissu urbain et des études sur les usages des bâtiments, sur les questions d'adduction d'eau et de gestion des déchets, les dernières années ont vu se développer des recherches qui sont plus en liaison avec des préoccupations contemporaines, qu'il s'agisse de questions associées à la santé (histoire de la médecine), à l'environnement (à travers l'archéologie et les textes), aux transferts interculturels, aux conflits religieux, crises économiques, histoire de la famille...

Une cinquantaine de chercheurs œuvrent sur les mondes romains, principalement sur l'Orient et l'Asie mineure (16), la Gaule (11) et l'Italie (10) mais aussi sur l'Afrique (3) et la Péninsule Ibérique (7). En histoire romaine, le poids des recrutements récents est plus faible qu'auparavant, en vertu du principe de répartition des postes entre les universités et le CNRS. Les recrutements se sont orientés principalement dans le domaine de l'épigraphie et l'histoire de la partie orientale de l'Empire romain. Avec les derniers lauréats, une passerelle entre histoire et droit romain est par ailleurs désormais ouverte. Outre la numismatique, l'épigraphie est l'une des grandes forces de la section, alors que ce domaine est sous-représenté dans l'enseignement supérieur. Il y a un lien à faire avec le poids de l'archéologie, dans la mesure où l'inscription est analysée aujourd'hui non seulement comme un texte écrit, mais aussi pour son support matériel, le contexte de l'affichage étant à présent pris en compte, c'est-à-dire celui du mode de communication. Bien présente au sein de la section, l'archéologie romaine s'illustre par la grande diversité des spécialités représentées (numismatique, archéozoologie, archéométrie, architecture, céramologie, histoire des ressources, des peuplements et des paysages) et ses multiples terrains. On doit constater cependant, derrière ces spécialisations, le faible poids de profils plus généralistes. Ce constat vaut d'ailleurs aussi pour l'archéologie médiévale. On

doit également relever la quasi-disparition de l'histoire de l'art antique et, quoique cela relève sans doute d'un autre phénomène, la faible proportion de spécialistes de l'Antiquité tardive, constat qui se mesure également dans l'enseignement supérieur où moins d'un EC sur dix est spécialiste de cette période.

Les prospectives montrent, en revanche, de réels besoins dans le domaine de la papyrologie pour l'étude de l'Empire romain, documentation très riche qui éclaire sur les aspects concrets du gouvernement de l'Empire et de

la vie quotidienne dans les communautés provinciales. Le besoin de chercheurs bien formés (et non pas seulement d'IR) dans le domaine des humanités numériques, en lien, principalement, avec l'épigraphie est également sensible de même que celui de chercheurs capables de mobiliser des méthodologies (statistiques, modélisation etc.) permettant de traiter des données archéologiques de plus en plus nombreuses et diverses pour répondre à des problématiques scientifiques est aussi un enjeu d'avenir crucial.

Tableau 3 : Répartition des 403 postes dans les Universités et les établissements d'enseignement supérieur par domaine chrono-géographique (*source : Annuaire SOPHAU 2018*).

Histoire Romaine	Archéologie/Art rom.	Histoire grecque	Archéologie/Art grec	Proche Orient	Égypte
147	56	117	37	28	18

Monde byzantin et Orient chrétien : Antiquité tardive et Moyen-Âge, Orient, Afrique

Paradoxalement, les travaux sur la première des ruptures majeures de ce champ, l'avènement du christianisme, sont assez peu représentés en France : en dehors d'une direction d'étude EPHE, rattachée au LEM (UMR 8584), sur les origines du christianisme, aucune équipe ou unité ne travaille sur ce domaine. Les textes fondateurs de cette religion sont actuellement totalement délaissés pour ce qui concerne le bassin oriental de la Méditerranée. Les recherches sur le **texte du Nouveau Testament**, son histoire et sa diffusion pendant cette période dans le monde hellénophone ont disparu du paysage de recherche français. De même, les travaux sur la transmission et la réception grecques de l'Ancien Testament, qui ont été longtemps un pôle d'excellence français (UMR 8167 et UMR 7297), sont actuellement en déshérence, faute de recrutements en ce domaine. Au contraire, les travaux sur la

Bible hébraïque témoignent d'un relatif renouveau (en particulier UMR 7297), avec un personnel réduit cependant. L'émergence d'un pôle de recherche, au niveau national, sur les textes bibliques, leurs transmissions, leurs traductions et leurs réceptions est un vrai *desideratum*, d'autant que l'approche non confessionnelle de la recherche française a peu d'équivalent en ce domaine à l'international.

Le domaine des **textes chrétiens de l'Antiquité et du monde byzantin** présente une situation contrastée. La France possède encore en ce domaine l'une des collections d'édition et de traduction de référence en la matière, avec les Sources chrétiennes (UMR 5189) ; cependant, l'équipe CNRS est aujourd'hui extrêmement limitée et ne dispose plus de spécialistes de latin. La réduction des postes de grec et de latin à l'Université a mis en danger ce domaine d'étude et le mettra plus encore en difficulté dans les années à venir du fait de la réduction du nombre d'étudiants formés. Pour la période médiévale byzantine, la masse de texte, dont une part considérable est inédite ou très mal connue, est considérable ; cependant, les

forces sont extrêmement réduites, avec une chaire à l'Université Paris-Sorbonne, qui vient d'être pourvue par un DR CNRS, et un CR en fin de carrière. Il n'y aura donc bientôt plus aucun philologue spécialiste de textes byzantins au CNRS.

Les travaux sur **les manuscrits et les papyrus** sont marqués par un réel dynamisme, portés principalement par l'IRHT (UPR 841) et diverses autres unités (UMR 8167, 5607, en particulier). Les équipes françaises sont étroitement associées aux processus de numérisation et contribuent fortement à structurer le champ de recherche en ligne, grâce aux infrastructures mises en place en particulier par l'IRHT. Ce domaine doit être soutenu sur la longue durée et apportera dans les années à venir des résultats considérables.

Les domaines de la **numismatique** et de la **sigillographie** byzantines sont actuellement couverts par un CR (UMR 8167) et par des retraités de la même UMR. Ce champ, qui a donné lieu dans les décennies précédentes à d'importants travaux, y compris dans le domaine de l'archéométrie en lien avec l'UMR 5060 (IRAMAT), paraît relativement délaissé et est à terme menacé.

Les études sur les **communautés chrétiennes d'Orient** sont représentées avec de grandes disparités en fonction des ères linguistiques et des supports matériels (textes, manuscrits, épigraphie, vestiges archéologiques) : on note un vide complet en ce qui concerne l'étude des textes arméniens et géorgiens, ou encore pour le Ge'ez (Éthiopie). Quant aux textes arabes chrétiens, aucun spécialiste ne s'y consacre à part entière. Les études coptes et syriaques sont davantage représentées ; en revanche, les études sur les domaines gnostiques et manichéens sont en voie de disparition.

Les études portant sur le **judaïsme oriental** de langue grecque et hébraïque sont actuellement résiduelles pour le Moyen Âge – malgré un recrutement en section 35 en 2019, mais tourné vers l'Occident. Les études archéologiques liées à l'histoire des communautés juives orientales ne sont quant à elles pas représentées en France. Les études portant sur l'histoire

des cultures zoroastriennes d'Iran sont actuellement représentées au Collège de France et à l'EPHE, mais ne le sont pas au CNRS.

Dans le domaine historique proprement dit, pour **l'Antiquité** et pour **le monde byzantin**, l'essentiel des forces se trouve du côté des universités. Les grandes entreprises en ce domaine, pour la partie orientale du Bassin méditerranéen, paraissent en suspens, comme la *Prosopographie chrétienne du Bas-Empire* pour l'aire orientale qui ne repose plus que sur un seul MCF. Le CNRS est aujourd'hui à peu près totalement absent de ce domaine, où il a autrefois joué un rôle non négligeable. Dans le domaine byzantin, on note un net développement des travaux sur la période paléologue (1261-1453), au détriment des périodes antérieures, aujourd'hui moins bien représentées. Ce dynamisme se manifeste entre autres par des études sur les interfaces culturelles et religieuses, en particulier avec le monde latin, mais aussi sur la continuité culturelle et religieuse byzantine au-delà de la césure constituée par la chute de Constantinople. Il correspond en outre à un réel développement des travaux et des réseaux scientifiques en ce domaine au plan international et constitue sûrement un domaine d'avenir. On notera également, dans ce cadre, des prolongements évidents dans le domaine des études slaves, qui ne sont par ailleurs quasiment pas représentées en France pour la période médiévale. Ce double mouvement devrait être encouragé.

Dans le **domaine archéologique**, la situation politique au Proche Orient a fortement compliqué la poursuite des travaux de terrain et forcé à une réorientation vers des terrains restés indemnes. À court terme, la situation a également poussé à mener à bien des publications en souffrance ou à ouvrir de nouveaux chantiers. Trois se distinguent tout particulièrement pour le dynamisme des chercheurs CNRS : le Kurdistan, l'Arabie Saoudite et l'Éthiopie. En revanche, pour la Grèce et l'Asie mineure de l'Antiquité tardive, un vide réel existe désormais depuis plusieurs départs en retraite.

Parmi les points forts de la recherche française dans ces domaines, il faut évoquer les **instituts français de recherche à l'étranger**, qui constituent à la fois des bases logistiques essentielles pour les missions archéologiques et archivistiques, autant que des outils de coopération avec les chercheurs locaux et les autres équipes internationales. La majorité des chercheurs de la section 32 qui travaillent sur les aires culturelles de ces centres ont une partie de leur activité qui en dépend et qui alimente en retour l'activité scientifique des instituts.

Un point est alarmant : alors que le CNRS, en développant son identité propre par rapport à l'université, fait le choix de couvrir des domaines rares, un **problème de transmission des compétences et des savoirs** des chercheurs CNRS vers le public étudiant se dessine. Cela pose la question non seulement de la formation dans des disciplines rares (à commencer par l'enseignement des langues anciennes), mais aussi de la perte de compétence au sein du CNRS si la transmission n'est pas possible. La question de la mise en place de **formations pour les étudiants dans des domaines de spécialité rares**, y compris pour les études aréales, et de leur articulation avec les cursus universitaires classiques, doit être posée.

En histoire, les approches visant à décloisonner les historiographies, permettant d'envisager des sociétés dans leurs interactions culturelles et religieuses, sont sans doute celles qui produiront les recherches les plus innovantes dans les années à venir.

Monde musulman médiéval

L'histoire de l'Islam connaît depuis une dizaine d'années d'importants renouvellements ; l'accent est désormais mis sur les marges du monde islamique (l'Éthiopie), les minorités (Kurdes, Ibadites, chrétiens et juifs), l'histoire diplomatique (échanges avec le monde extérieur), l'histoire du droit, les pra-

tiques alimentaires, l'histoire des textes, etc. De nombreux recrutements ont eu lieu aussi bien à l'université qu'au CNRS.

L'université compte 5 professeurs, dont deux nouvelles chaires (Bordeaux et Aix-en-Provence) et quatre nouveaux MCF (Montpellier, Nanterre, Paris 7, Paris 8) recrutés ces dernières années.

Un programme lancé par le ministère de l'intérieur sur l'islam et la cité ou encore la question de la déradicalisation, toutes périodes confondues, a abouti par ailleurs au recrutement de 3 MCF sur le Moyen Âge (Aix-Marseille, Paris 1, Strasbourg).

Au CNRS, les recrutements sont en revanche moins nombreux, face à des départs à la retraite beaucoup plus importants, mais 4 CR et un IR ont été recrutés depuis 2014 et l'on compte par ailleurs deux promotions de DR.

L'archéologie islamique reste le parent pauvre de la spécialité ; très peu de chantiers archéologiques nouveaux sont ouverts ces dernières années et les jeunes chercheurs formés à l'archéologie de terrain sont rares. Le contexte géopolitique est difficile (Iran, Syrie, Yémen, Égypte, Libye et Algérie) à l'exception du Maroc, de l'Éthiopie et de l'Arabie. Les accords de partenariat entre l'Institut national du Patrimoine (Tunis) et la Maison méditerranéenne des Sciences de l'Homme (MMSH), la mise en place du programme ATHAR et la création de l'Institut d'Archéologie méditerranéenne devraient permettre néanmoins d'ouvrir de nouveaux chantiers archéologiques en Tunisie et en Algérie et de donner un nouvel élan aux études anciennes et médiévales en Afrique du Nord.

Monde médiéval occidental

Pour le Moyen Âge occidental, depuis 2014 ont été recrutés quatre historiens (une spécialiste de l'histoire religieuse de l'Occident, deux historiens de l'économie et des échanges marchands, une spécialiste de la rhétorique latine),

deux philologues latinistes ainsi que quatre archéologues (un numismate, une archéomètre spécialiste du verre, un spécialiste des métaux et un archéobotaniste). Le renouvellement des études médiévales par une plus grande proximité avec les sources écrites se poursuit, tandis que le regain d'intérêt pour l'histoire économique et sociale constaté dans le rapport de 2014 se confirme. S'il est heureux que certains secteurs soient ainsi sauvegardés ou renforcés, d'autres – pourtant très importants en raison de l'ampleur de la documentation conservée et de leurs nombreuses implications scientifiques – demeurent très largement en marge des recrutements, tant au CNRS qu'à l'Université.

Ainsi, la philologie vernaculaire, mais plus largement l'histoire des textes en vernaculaire (slave, germanique, roman), est largement absente de la recherche historique, comme de la musicologie et de l'histoire de l'art.

Malgré une forte présence de l'histoire religieuse au CNRS et à l'université, les études sur la liturgie chrétienne, tant du point de vue historique, philologique, musicologique, iconographique qu'archéologique demeurent en retrait. Enfin, l'histoire des sciences médiévales dans ses différentes composantes (histoire sociale et intellectuelle des sciences) est encore absente des recrutements malgré un renouveau des recherches dans ce domaine exigeant.

Pour l'histoire sociale et économique, au delà d'une histoire traditionnelle, à l'articulation entre économie et société, on note trois autres combinaisons : (1) l'une entre technique et économie, qui constitue même un des aspects majeurs de l'histoire des techniques du Moyen Âge occidental (tant en histoire qu'en archéologie, autour du thème de l'expertise par exemple ou de l'industrie), confirmé par un recrutement récent ; (2) une seconde entre économie et politique (avec le phénomène des grandes enquêtes ou la construction d'un cadre législatif et d'outils juridiques et comptables propres au développement de l'économie médiévale), confirmé par un recrutement récent ; (3) enfin un courant dynamique étudie les liens entre économie, pensée de l'économie et de la société et théologie

autour des écrits franciscains, en particulier. Cette mutation de l'histoire économique s'est particulièrement régénérée à partir des rapprochements interdisciplinaires entre historiens et archéologues, qui ont suscité l'émergence de champs d'études qu'il convient de ne pas abandonner.

Enfin, de longues campagnes et enquêtes dans les très nombreux fonds d'archives très largement inexplorés du second Moyen Âge, ainsi que des éditions de sources, demeurent essentielles. Dans un contexte de nette réduction du nombre des postes à l'Université, on ne peut que souligner l'importance qu'il y a à recruter au CNRS des historiens du Moyen Âge occidental.

Les constats faits en 2014 sont donc toujours d'actualité. On rappellera également que l'archéologie médiévale peine toujours à s'installer pleinement à l'université et donc à se développer en dehors du CNRS, alors qu'il est assez paradoxal de souligner que la discipline a pu construire des questionnements autonomes, qu'elle est devenue largement diachronique entre Antiquité et Temps Modernes, qu'elle possède par ailleurs une large expertise en matière d'interdisciplinarité, de traitement de données hétérogènes, de comparaison de sources et qu'elle a intégré depuis longtemps les disciplines naturalistes et l'archéométrie. Ce n'est sans doute pas un hasard si les derniers recrutements réalisés en section 32 dans les domaines de l'exploitation des ressources (métaux et patrimoine agronomique), des matériaux (verre), et des usages monétaires sont, parmi les profils archéologiques, ceux qui sont les plus transversaux et les plus diachroniques. L'effort porté par le CNRS est néanmoins largement insuffisant et il manque paradoxalement, comme en archéologie antique, des généralistes capables de répondre aux nouveaux enjeux de synthèse.

Archéométrie

L'archéométrie, synergie entre Sciences humaines et Sciences dites « dures », natura-

listes, physico-chimistes ou biologistes, témoigne d'une dynamique en constante évolution. Elle est structurée autour d'UMR interdisciplinaires du CNRS, de laboratoires du Ministère de la Culture mais aussi autour de réseaux (RTP archéométrie, réseau CAI-RN de la MITI, GMPCA), d'écoles thématiques, de formations et de congrès. La section 32 compte actuellement une vingtaine de chercheurs relevant de ces approches et un nombre équivalent d'enseignants chercheurs et de personnels d'accompagnement de la recherche. Une vingtaine d'UMR accueille actuellement des personnels relevant de la section 32 qui ont recours aux méthodologies de l'archéométrie. Ces personnels présentent deux profils :

- historiens et archéologues utilisant les méthodes et les concepts de l'archéométrie ;

- chercheurs et ingénieurs issus des autres disciplines scientifiques qui développent et appliquent des protocoles d'étude en lien direct avec les problématiques des sciences humaines.

Cette mixité, génératrice d'une interdisciplinarité réelle, a produit des résultats majeurs sur le plan de la recherche préhistorique ou historique, archéologique et anthropologique et constitue un modèle pour la communauté internationale. Son intérêt et son bienfondé ne sont plus à démontrer, mais au contraire à renforcer.

On observe depuis ces dernières années un déséquilibre de recrutement entre ces deux populations au détriment de la seconde. Un des enjeux cruciaux des prochaines années sera donc de rétablir l'équilibre entre ces deux types, afin de s'adapter et de suivre les nouveaux développements technologiques qui émergent, et d'explorer les nouvelles avancées issues de disciplines ou de méthodologies jusque-là ignorées ou sous exploitées : à titre d'exemple, les recherches menées sur les traitements statistiques, les applications de l'intelligence artificielle ou la génomique.

L'exploration des ces nouveaux champs méthodologiques dans le cadre de doctorats apparaît tout aussi fondamental et nécessite la mise en place d'une politique volontaire de

financement de thèses de la part du CNRS. Seule cette politique permettra de développer et d'enrichir une recherche archéométrique directement intégrée dans les problématiques archéologiques et historiques des sciences humaines. **L'archéométrie ne peut pas et ne doit pas en effet se résumer à une relation de type « utilisateurs/prestataires de services » et n'a pas pour seule vocation les approches ayant trait à la conservation et la restauration des objets du patrimoine.**

On rappellera aussi le rôle fondamental des personnels d'accompagnement de la recherche indispensables à la fois pour la maintenance des plateformes instrumentales mises en place au sein des UMR et pour le développement et la mise en œuvre de protocoles dédiés aux problématiques archéologiques et historiques.

Ces développements méthodologiques, qui nécessitent de mener des travaux exploratoires et de constituer des référentiels de très grande taille, impliquent de travailler sur le long terme et ne sont pas toujours compatibles avec une politique de projets. Ces recherches nécessitent donc la mise en place de financements récurrents et d'un plan de recrutement sur le long terme.

Archéologie : renforcer le rôle indispensable du CNRS

L'archéologie au sens large et les sciences de l'archéologie sont par essence constitutives de pratiques et d'expérimentation interdisciplinaires et internationales. La discipline regroupe de fait près de la moitié des chercheurs de la section qui, outre les domaines traditionnels ou plus spécialisés en bioarchéologie, anthropologie et archéométrie, apporte aussi des expertises exigeantes sur les premières écritures, les langues anciennes et rares, par l'intermédiaire de l'épigraphie et de la philologie, ou sur l'histoire de la monnaie à de multiples échelles et dans diverses aires culturelles.

En France, ces chercheurs s'intègrent aujourd'hui dans une communauté scientifique

hétérogène, estimée à 4 000 agents (source HCERES 2019, p. 106) – ce qui est une force réelle pour l’avenir d’une discipline désormais ancrée dans la cité – et dans des réseaux internationaux structurés à l’échelle mondiale par les Écoles Françaises à l’Étranger, des UMIFRE et des USR. C’est sur ces deux terrains complémentaires qu’interviennent les chercheurs et EC de la section 32, dans un domaine où la recherche française dispose par ailleurs d’un haut niveau de savoir-faire et possède encore un réel *leadership*, il n’est peut-être pas inutile de le rappeler.

Dans cette conjoncture générale sur le plan national, parfois négligé, les deux dernières décennies ont été marquées par le développement de l’archéologie dite préventive et l’intégration de ses personnels dans les UMR, selon des modalités très libres à l’échelle de chaque unité, ce qui en favorise la richesse et la diversité, gage de créativité et de l’élaboration de nouvelles synergies scientifiques. Parallèlement, les fouilles programmées nationales – qui sont aussi des chantiers-écoles où sont formés les doctorants, avant de pouvoir évoluer sur des terrains plus lointains – sont devenues plus rares, de moindre ampleur et peut-être plus difficiles à exécuter, sinon littéralement portées à bout de bras par les chercheurs qui parviennent encore à maintenir ce haut niveau de responsabilité sur le terrain avec une passion vertueuse. Il est nécessaire de s’interroger sur les adaptations qui devront faire évoluer cet écosystème, car il est à la fois impératif de pouvoir former les futurs chefs de mission et d’endiguer des hyperspécialisations par sous-secteur disciplinaire alors que la discipline, contrainte dans l’Hexagone par la primauté du cadre économique, manque clairement de chercheurs généralistes, capables de répondre aux enjeux de synthèses attendues et de trouver des modes opératoires désormais adaptés à la production massive de données.

Dans une synergie complexe mise en œuvre au sein des UMR, entre échelle régionale, nationale et internationale, entre nature et culture, entre une protohistoire agrammate ou relevant pleinement depuis le Néolithique

d’une période « historique » ou, à l’autre extrémité de la chronologie, d’un Moyen Âge archéologique que l’on ne sait pas toujours border avant la révolution industrielle, la construction de passerelles entre instituts et notamment entre les sections 31, 32 et 33 doit se poursuivre. Les équipes rassemblées dans les unités de la 32 peuvent contribuer à donner une réelle épaisseur à ces interfaces et à l’écosystème général en :

- poursuivant de nouvelles approches théoriques et appliquées sur les questions de spatialité confrontées au temps long, notamment par le recours à de nouveaux outils et technologies (Imagerie, Lidar, modélisation, mathématisation etc.).

- produisant des synthèses associées à une contextualisation historique exigeante et en se confrontant aux nouveaux défis méthodologiques qu’engendre une production exponentielle des données, nécessitant une nouvelle ergonomie de recherche.

- défrichant des thématiques et surtout des terrains qui ne soient pas ceux, trop exclusifs, des espaces du développement économique contemporain (abords des villes et plaines) où sont réalisés la plupart des grands travaux d’aménagement du territoire

- continuant à offrir une réelle continuité de recherche et d’expertises fondamentales dans les études longues, vouées à l’analyse de monuments complexes, (châteaux, cathédrales, abbayes notamment souvent classés Monuments Historiques), mais aussi à « l’habiter » et à l’histoire de la construction, de l’architecture et des matériaux.

- explorant et en développant de grandes thématiques transversales, sur la question des « données massives », sur l’histoire de la monétisation des échanges avant les temps modernes, sur la dynamique d’urbanisation et la constitution des réseaux urbains et villageois dans toute leur épaisseur chronologique, soit depuis les phénomènes d’émergence jusqu’à la capillarité des systèmes de villes de la fin du Moyen Âge, sur la production animale encore ou sur l’interface Santé/SHS, par l’intermédiaire d’une **contextualisation historique exi-**

geante des grandes épidémies, des épizooties et surtout des échantillons qui ouvrent aujourd'hui les travaux pionniers en paléogénétique mais aussi dans le domaine des données isotopiques.

Une piste possible d'adaptation à cette nouvelle conjoncture est celle **d'une plus grande fluidité entre les UMR** et les sites par la constitution de réseaux et d'appels exploratoires sinon par la création d'une USR ou de plusieurs USR multi-sites, spécifiquement dédiées à l'archéologie, qui permettraient de coordonner moyens, ressources humaines, partenariats et coopérations scientifiques. L'adaptation à des situations d'urgence et de catastrophe, comme dans le cas de Notre Dame de Paris, montre en tout cas que le CNRS dispose de cette capacité réactive, que ses chercheurs savent se mobiliser et construire ces nouvelles synergies.

Sur le plan international, les récentes ouvertures pionnières réalisées en Afrique du Nord et sub-saharienne, en Asie centrale et orientale, bien qu'insuffisantes, complètent désormais le dispositif traditionnel affaibli par les départs à la retraite en Méditerranée et au Proche-Orient, tandis que les bouleversements politiques que connaissent certaines régions du monde ont entraîné des redéploiements et des adaptations, au moment même où le recrutement d'archéologues de terrain se raréfie. De fait, ces situations tendues ont fait émerger de nouveaux enjeux, scientifiques, techniques, mais aussi éthiques face aux destructions de sites et de monuments emblématiques, face aux archives des missions et fouilles, face à la conservation, à l'accès et aux circulations (pillages) des objets-sources.

Plus généralement, la section partage la vision **d'une archéologie française plus « anticipatrice »** mise en avant par le récent rapport du HCERES consacré à la discipline, capable donc de s'ouvrir aux défis du changement climatique, aux situations de catastrophes, mais aussi et surtout qui puisse continuer de s'inscrire dans une démarche fondamentalement exploratoire, sur des sites, des lieux et des espaces de conservations remarquables afin de susciter de nouveaux développements. Entre nature et culture, l'un des grands enjeux

interdisciplinaires des approches que permet ou suscite l'archéologie historique demeure peut-être aussi cette notion très large de crise et les échelles conceptuelles qui permettent de l'envisager, dans la durée longue des changements et de la résilience des sociétés complexes anciennes et médiévales, aux aléas.

Humanités numériques, IA, thématiques et méthodologies émergentes

Le paysage de la recherche dans le domaine des Humanités numériques s'est davantage structuré ces dernières années grâce au développement des TGIR, Huma-Num et PROGEDO pour les SHS, infrastructures auxquelles les acteurs de la recherche sont de plus en plus sensibilisés notamment pour gérer leurs données numériques, natives ou non. Il en a résulté en particulier une dizaine de consortiums labellisés par Huma-Num et réunissant plusieurs unités et équipes de recherche autour de thématiques et d'objets communs (par exemple pour l'archéologie le consortium MASA : Mémoire des Archéologues et des Sites Archéologiques).

Dans l'un des grands domaines de recherche de la section, celui des manuscrits et des textes, **l'analyse automatisée des écritures anciennes et la reconnaissance automatisée de texte** dans les écritures manuscrites, avec recours à l'intelligence artificielle sont des pratiques en pleine évolution. Outre le consortium TEI et Dariah, plusieurs expérimentations comme eScriptorium et plusieurs projets ANR sont déjà lancés. Cependant, il ne s'agit encore que de recherches exploratoires, qui sont loin de concerner toutes les langues et écritures. On note par ailleurs un large développement des outils électroniques, qu'il s'agisse de bases de données librement accessibles, de textes balisés en xml/TEI, mais aussi de structuration du champ par la mise en place d'identifiants stables et de référentiels pour la discipline. En revanche, la France est en retard

dans le domaine de la photographie des manuscrits, y compris la **photographie multi-spectrale**, qui permet d'accéder en particulier à des écritures effacées. On relève aussi une faible articulation avec l'archéométrie et une faiblesse des études sur les matériaux du livre et de l'écriture.

Le passage à **l'édition électronique critique des textes et documents** ne peut se faire cependant de manière massive, faute d'infrastructure nationale et de solution d'utilisation aisée pour les chercheurs. La mise en place d'une telle plateforme d'édition électronique est une nécessité pressante pour l'ensemble de la communauté scientifique, et seul le CNRS peut la soutenir en France, en fournissant l'infrastructure et la pérennité nécessaires.

Dans le domaine des sciences de l'archéologie, de nouvelles avancées et méthodologies sont également à attendre dans **l'automatisation du traitement des données** mais aussi et surtout dans la collecte de données sur le terrain, dès la fouille en considérant les chantiers comme des laboratoires à ciel ouvert. L'imagerie et les analyses non destructives, les reconstructions virtuelles tridimensionnelles, un usage plus systématique et mieux programmé de la technologie LIDAR dans les zones forestières sont des voies de développement. Des unités d'intervention disposant de laboratoires mobiles peuvent apporter des

solutions pour intervenir dans des zones du monde soumises au grand banditisme, là où il n'est plus possible d'envisager des missions traditionnelles de plusieurs mois d'intervention. Au delà des numérisations d'objets et de monuments, les applications de l'intelligence artificielle montrent déjà des évolutions dans les calculs de profils et de volumes qui permettent de modéliser par exemple des techniques de creusement de galeries de mine, tandis qu'il sera sans doute possible d'élaborer à plus grande échelle des modèles d'évolution et de transformation de systèmes complexes. À cet égard les données accumulées et qui chaque jour croissent sur le sol hexagonal **font de la France non pas un pays-musée, mais bien un pays-laboratoire exceptionnel** à échelle réelle, dans lequel le renforcement du soutien du CNRS demeure indispensable aux côtés des formations qu'offrent les universités et de la richesse des synergies opérationnelles qu'apporte la diversité des acteurs de l'archéologie de terrain désormais réunis dans les UMR.

Dans une perspective plus propre à l'évolution de la section 32, il faudra sans doute veiller dans cet autre domaine émergent qu'est la génomique (études ADN, des populations humaines, animales mais aussi végétales) à ce que les unités intègrent aussi des chercheurs issus de ces disciplines scientifiques (et pas seulement des IR).

SECTION 33

MONDES MODERNES ET CONTEMPORAINS

Composition de la section

Laure QUENNOUËLLE-CORRE (présidente de section), Anaïs WION (secrétaire scientifique 2019-2020), Yannick BRUNETON, Olivier DARD, Anne-Marie GRANET-ABISSET, Élie HADDAD, Catherine JAMI, Philippe JARNOUX, Julien LÉONARD, Laurence MONTEL, Sophie RAUX, Mercedes VOLAIT. De 2016 à 2019 : Leyla DAKHLI, Anaïs WION. De 2016 à 2018 : Bruno DUMONS, Emmanuel FRANCIS (secrétaire scientifique). En 2016-2017 : Vincent GOURDON, Romain HURET. En 2018 : Dominique JUHÉ-BEAULATON. Depuis 2018 : Annick LEMPÉRIÈRE. Depuis 2019 : Marie-Emmanuelle CHESSEL, Laurent HEYBERGER, Corinne LEFEVRE, Francine-Dominique LIECHTENHAN.

Résumé

Après une vue d'ensemble sur l'évolution du périmètre de la section, qui couvre les unités sous sa tutelle principale, les chercheurs rattachés à la section ainsi que les ingénieurs et techniciens, ce rapport synthétique se concentre sur le bilan et les perspectives dans les quatre principaux champs qui la caractérisent : histoire moderne, histoire contemporaine, histoire de l'art et les aires culturelles. À l'intérieur de ces champs, l'accent a été mis sur les évolutions thématiques récentes générales ou spécifiques à des domaines. La dernière partie est consacrée aux nouvelles sources et aux nouvelles écritures de l'histoire qui interrogent le métier d'historien : la source orale, les sources visuelles, la pratique de la pluri- et de l'interdisciplinarité et enfin le poids des humanités

numériques tout au long de la chaîne de production historique.

Introduction

Le présent rapport de conjoncture, établi durant l'année 2019 par les membres de la mandature 2016-2021, propose quelques éclairages sur la situation de la recherche française en histoire moderne et contemporaine ainsi qu'en histoire de l'art. Les outils mobilisés pour cette synthèse sont tout d'abord l'observation et les connaissances acquises après plusieurs sessions d'évaluation des dossiers de chercheurs (chercheurs CNRS et enseignants-

chercheurs demandant des délégations), d'unités, de projets de GDR (groupement de recherche), d'écoles thématiques, de revues, etc., évaluations qui composent une bonne part du travail de la section. Par ailleurs, les dossiers et les auditions des candidat-es au concours de CRCN offrent une exceptionnelle plateforme d'observation de la jeune recherche. Des échanges avec les directeurs d'unités ont aussi fourni des éléments d'appréciation du fonctionnement institutionnel. Pour compléter cette expertise avant tout qualitative, quelques outils quantitatifs sont à notre disposition, tels que le répertoire des thèses et surtout le logiciel Zento du CNRS fournissant des données brutes relatives au personnel et aux structures. Ce rapport de conjoncture est ainsi basé sur des données hétérogènes et avant tout pragmatiques et ne peut en aucun cas fournir un tableau exact et exhaustif de la recherche française en histoire en 2019. Il ne reprend pas les données déjà décrites, de façon remarquable, dans le rapport de conjoncture de 2014, et qui pour la plupart sont toujours d'actualité cinq années plus tard, mais s'attache plutôt à détailler les évolutions. Nous renvoyons donc à ce précédent rapport pour la longue description de la situation structurelle et institutionnelle de la recherche française en histoire et en histoire de l'art.

I. Généralités

A. Unités de la section

Il y a 45 structures qui dépendent du CNRS et entrent dans le périmètre de la section 33. Toutes dépendent de l'INSHS, mais deux d'entre elles ont un autre Institut comme rattachement secondaire (INEE et INSIS). Parmi ces 45 structures, on compte 23 UMR et 12 USR, ainsi que 5 UMS, 3 GDR et 2 FRE. On voit donc que le processus de réduction du nombre d'UMR est

parvenu à un moment de stabilité (elles étaient 37 en 2005 et 26 en 2014), et les UMR de grande taille issues de ces groupements entament désormais leur second contrat quinquennal, le plus souvent en ayant trouvé leur cohérence et leur structuration scientifique.

Pour ce qui est de leur répartition géographique, la concentration des structures en Ile-de-France demeure avec 28 structures ventilées sur 44 sites [données avant le début des emménagements à Condorcet], dont 14 font partie de PSL. 5 sont à l'étranger (sur 7 sites) et sont donc des UMIFRE. Les autres sont en région, ventilées sur l'ensemble de la France mais avec une plus forte concentration en Auvergne-Rhône-Alpes (principalement à Lyon) et en Provence-Côte d'Azur (Aix-Marseille).

28 unités ont bénéficié des 34 recrutements au concours de CR sur la période 2015-2019. Treize des 34 nouveaux chercheurs ont été affectés en région, dans 9 unités différentes.

B. Membres permanents des unités

1. Chercheurs (CR et DR)

Comme souligné dans les rapports de conjoncture précédents, les chercheurs CNRS sont minoritaires (15% à 20%) dans les effectifs des membres permanents de la recherche française. Les unités spécialisées dans les aires culturelles sont plus richement dotées en personnels CNRS que des structures plus généralistes.

Si en 2014 et selon le précédent rapport de conjoncture, le nombre de chercheurs CNRS dépendant de la section était de 212, alors qu'il était de 220 en 2008, il n'est en juillet 2019 plus que de 188 (et 186 en septembre 2019). On observe un rapport de 2/3 de CR pour 1/3 de DR, avec les chiffres bruts suivants : 124 CR (dont 8 HC) et 64 DR (44 DR2, 18 DR1, 2 DRCE). Là encore, la comparaison avec les chiffres de 2014 montre clairement que les départs à la retraite ne sont aucunement

compensés par de nouveaux recrutements, puisqu'en 2014 ce même décompte donnait : 136 CR (22 CR2, 114 CR1) et 76 DR (43 DR2, 29 DR1, 4 DRCE). La perte de postes est donc de 12 dans le corps des CR et de 12 en DR, soit plus de 10% de l'effectif par rapport à 2014.

Les tranches d'âge les plus représentées sont celles des 40-44 ans (23%) et 45-49 ans (19%), mais les chercheurs de plus de 60 ans représentent néanmoins 18% de l'effectif total, tandis que les moins de 40 ans ne sont que 12,5%, ce qui témoigne d'un déséquilibre en défaveur de la jeune recherche.

À ce stade, un point sur les recrutements lors de cette mandature peut être intéressant. 34 postes de CR ont été mis au concours en 5 années (de 9 à 5 postes par an), et l'âge de recrutement, exprimé en «âge de recherche» qui correspond au nombre d'années séparant la thèse du recrutement, reste relativement bas, conformément aux attentes de l'institution. Ainsi 13 personnes ont été recrutées à moins de 3 années après la thèse, 10 entre 4 et 6 années, 7 personnes entre 7 et 9 années, et 4 personnes à plus de 10 années après la thèse. L'âge de recrutement tardif est marqué par le genre, ce sont majoritairement des femmes qui sont recrutées à plus de 7 années après la thèse (8 femmes pour 3 hommes). Le recrutement tardif n'est pas corrélé aux aires culturelles, l'apprentissage des langues ou la nécessité de réaliser des missions de terrains ne paraissent ainsi pas être des facteurs d'allongement de la

durée des thèses. Au niveau des recrutements, une parité exacte a été réalisée, soit 17 hommes et 17 femmes, ce qui correspond à une répartition à peu près équivalente à la part d'hommes et de femmes parmi les candidats.

Au sein des membres permanents en section 33, la parité n'est pas loin d'être acquise puisqu'il y a 47% de femmes en tout, et que ce chiffre vaut aussi bien pour le corps des CR que pour celui des DR, avec une progression quasiment équivalente de la parité dans ce dernier corps (45 DR2 dont 24 femmes ; 17 DR1 dont 7 femmes, qui est donc la promotion pour laquelle un effort doit encore être fourni ; 2 DRCE dont 1 femme). Il n'y a donc pas de réel décrochage quantitatif, mais pour vérifier l'égalité de traitement et des carrières, il faudrait pouvoir accéder aux âges auxquels les femmes accèdent à chacun des corps -on a vu que les recrutements en CR étaient plus tardifs chez les femmes- et aux différents grades, ce que les outils à notre disposition ne permettent pas. Nous pouvons simplement observer que les femmes ont en moyenne deux années de plus que les hommes en DR2 mais sont sensiblement plus jeunes d'une année en DR1. Enfin, lorsque l'on dispose du nombre de promouvables et du nombre de candidates comme pour le concours 2019 (voir tableau ci-dessous), force est de constater que la partie se joue en amont des concours ; la conclusion s'impose : pour atteindre la parité dans le corps il faut inciter les chercheuses à se présenter.

Parité au concours DR2 2019.

	Hommes	Femmes	Total	% Femmes
Promouvables CR → DR	59	60	119	49,58%
Candidat(e)s	13	8	21	38%
Dont soumis-(e)s à IE	1	2	3	66%
Admis(e)s à concourir	13	6	19	32%
Dont CR CNRS	9	4	13	31%
Admis(e)s à poursuivre	8	3	11	27%
Admissibles	3	3	6	50%
Classé(e)s rang utile	2	2	4	50%

2. Situation des ingénieurs et des techniciens

Faute de moyens pour une enquête rigoureuse et systématique, la section ne peut que se faire l'écho de savoirs pragmatiques acquis notamment lors des visites de laboratoires, effectuées dans le cadre de l'HCERES par certains membres du comité national. Cette présence se révèle très fructueuse, tant sur le plan de l'analyse de la situation des IT au sein du laboratoire (notons que les chercheur-e-s des comités de visite sont en général assez peu sensibilisés au sort matériel et moral des IT et que, par conséquent la présence d'un IT est absolument indispensable) que de celle du fonctionnement général d'un laboratoire qui n'existe que par l'interrelation entre IT et chercheurs. Les IT, qui sont d'une grande richesse pour les unités, se positionnent comme un accompagnement dans les travaux des chercheurs afin de leur donner plus de temps à consacrer à leurs recherches scientifiques. Les observations faites lors de ces visites permettent de dégager quelques points dont une carence en personnels d'appui, une évolution peu satisfaisante des carrières et le vieillissement de la population des IT notamment pour les BAP J et F. Des problèmes démographiques se posent avec acuité, en particulier pour la BAP D (sciences humaines et sociales, traitement et analyse des données), celle qui compte le plus d'ingénieur-e-s et la plus grande qualification disciplinaire, actuellement en voie d'extinction. Cette communauté se caractérise pourtant par une grande diversité des métiers (ingénieurs d'analyses des sources historiques, culturelles ou archéologiques et de lexicométrie, géomaticiens) et par une importante production scientifique et technique (bases de données, blogs, sites web, publications électroniques, etc.). D'une façon générale, il est constaté que les IT déplorent le manque de recrutements, le nombre restreint de postes offerts à mobilité (Noémi). Pour la plupart bien intégrés au monde de la recherche, les IT doublent leurs connaissances et compétences techniques, par le biais de formations. Nombreux-ses sont celles et ceux qui animent des séminaires, participent aux projets collectifs, produisent et/ou

publient. Le numérique rend indispensable une véritable synergie chercheurs / ingénieurs / techniciens voire une redéfinition des rôles, à tout le moins une étroite coopération. Faute d'un outil de mesure de leur activité du type Ribac, indépendamment du projet VariSHS qui n'est pas encore généralisé, l'importante production des IT (publications et autres) n'est nulle part comptabilisée comme production du CNRS. Pour avoir une juste connaissance de l'ensemble des « produits et productions » des laboratoires, il faudrait incontestablement prendre en compte ceux des ingénieurs. Le système actuel d'évaluation, différent pour les chercheurs et les IT n'est pas forcément adéquat ni même considéré par les Directeurs d'unités. Une seule structure d'évaluation, du type comité national mais comprenant des représentants des divers corps de métiers, serait sans doute plus pertinente. La diversité des activités d'un IT peut nuire à sa reconnaissance en termes de métier. Une des richesses incontestables du CNRS est aussi d'avoir un personnel « hybride, généraliste ».

Enfin, la politique de recrutement du personnel d'appui formé aux aires culturelles reste plus que jamais nécessaire. Un point de vigilance est nécessaire sur les bibliothèques spécialisées et leurs personnels d'appui à la recherche dans le cadre des recompositions actuelles et de la mise en commun des fonds, afin que la politique de recrutement réponde aux spécificités des études aréales en engageant des personnels formés aux langues modernes et anciennes, aux Humanités Numériques, à la communication internationale (gestion de convention, gestion de projet avec des institutions partenaires non-européennes).

177 agents IT permanents sont rattachés à la section 33.

31 sont dans la BAP D (traitement et analyse de données)

28 dans la BAP E (informaticiens)

67 dans la BAP F (documentation, édition, corpus)

2 dans la BAP G (logistique)

49 dans la BAP J (administration)

Parité chez les IT :

118 femmes et 59 hommes

Le corps des IR est composé de 30 hommes et 2 femmes. La disparité est donc très forte dans le corps le plus élevé des IT.

Répartition par corps et grades :

32 IR (dont 5 IRHC)

77 IE (dont 27 IEHC)

36 AI

29 Techniciens

II. Sur les champs relevant de la section

A. Histoire moderne

Sans revenir sur les constats généraux effectués dans le rapport de conjoncture de 2014 et qui restent d'actualité, quelques éléments peuvent être soulignés concernant l'histoire moderne. Dans les universités, celle-ci a bénéficié de 47 recrutements de MCF, dont 10 en histoire de l'art, des cultures visuelles ou de l'architecture. Sur les 37 restants, l'histoire culturelle, des savoirs ou du livre d'une part, l'histoire des relations internationales, de la diplomatie et du phénomène militaire d'autre part dominant (7 recrutements pour chacun de ces groupes thématiques). On note cependant une évolution par rapport à la période précédente : l'histoire économique et sociale est davantage présente (6 profils) ainsi que l'histoire sociale et politique (5 profils dont deux 2 orientés vers l'histoire de la police). 2 recrutements sont spécifiés « humanités numériques ». Études ottomanes, études juives, histoire du genre et histoire des femmes ont fourni un recrutement chacun.

Au CNRS, sur les 34 chargés de recherche recrutés depuis 2015, 6 seulement sont spécialistes uniquement d'histoire moderne et 6 ont présenté un projet portant sur les deux périodes moderne et contemporaine. Le déséquilibre dans la section s'accroît donc encore par rapport à ce qui avait été noté en 2014, la situation restant notamment inquiétante pour les XVI^e et XVII^e siècles en raison du faible nombre de projets portant sur ces périodes, même si la section 33 a été attentive à ne pas délaissier ces périodes, notamment par des recrutements de chercheurs travaillant sur la longue durée.

Cette faiblesse des modernistes est préoccupante pour l'avenir de la recherche historique par le risque qu'elle fait peser d'une trop grande focalisation sur les questions de notre monde contemporain en le coupant d'une compréhension des sociétés desquelles il a émergé et du décentrement que ces dernières imposent à notre regard sur nos sociétés actuelles. Pour les chargés de recherche, il accroît les problèmes d'insertion en province où il est de plus en plus difficile de former des équipes suffisamment nombreuses. Les nouvelles recrues se trouvent souvent isolées, et donc peu stimulées, dans un contexte qui favorise l'histoire contemporaine. La forte augmentation de l'âge des chercheurs entrant dans le système leur a peut-être permis d'établir un réseau national ou international, mais qu'en est-il de leur intégration ?

Ces recrutements confirment par ailleurs la montée d'une histoire sociale, qu'elle soit du politique (5 projets de recherche dont un orienté vers l'environnement), de la culture (3 recrutements) ou de la religion (1 recrutement). L'histoire économique est centrale dans 2 projets retenus. Enfin un projet concerne l'histoire de l'art. Dans les aires couvertes, l'Europe domine avec 9 projets, mais parmi ces derniers 2 portent sur l'Europe de l'Est, 3 sur l'Europe du Sud et l'espace méditerranéen, 2 s'étendent jusqu'aux Amériques. Enfin, 2 projets portent sur l'Asie (Asie centrale et Chine).

D'une manière générale, si la France, l'Europe orientale et du centre-Est, l'Italie (surtout en histoire de l'art) et l'Europe du Nord-Ouest

ont attiré des doctorants et conduit à des recrutements, il faut souligner la faible présence du monde germanique, de l'Amérique latine et de la partie asiatique de l'empire russe (à l'exception de l'Asie centrale).

Les thèses soutenues depuis 2015 et en cours actuellement donnent des indications cohérentes avec ce qui précède⁽¹⁾. L'histoire moderne représente moins de 25 % du total des thèses d'histoire moderne et contemporaine. Si beaucoup de thèses d'histoire médiévale incluent désormais le *xvi^e* siècle, ou au moins sa première moitié, l'inverse n'est pas vrai : les modernistes répugnent à s'engager sur le *xv^e* siècle. En revanche, à l'autre extrémité, beaucoup de thèses commencent dans les années 1750, voire les années 1780, et se prolongent sur tout le *xix^e* siècle, voire jusqu'en 1914. Dans la pratique, ce sont bel et bien des thèses d'histoire contemporaine qui prévoient quelques réflexions initiales sur le *xviii^e* siècle. Faut-il y voir un affaiblissement de la période moderne ? L'histoire de l'art, proportionnellement importante, est un cas particulier en raison de la complexité d'une définition chronologique de la Renaissance qui remonte clairement au *xv^e* siècle, voire fin *xiv^e* dans certains cas. À l'inverse, les thèses d'histoire de l'art se prolongeant sur le *xix^e* siècle sont un peu plus rares. D'une façon générale, sauf dans ce cas de l'histoire de l'art, il y a un très net déséquilibre en faveur du *xviii^e* siècle. Le *xvi^e* siècle est en cours d'affaiblissement prononcé : environ 26 % des thèses soutenues incluent cette période, mais environ 20 % des thèses en cours seulement, la proportion étant encore plus faible si on met à part les thèses d'histoire de l'art.

La moitié des thèses environ sont soutenues à Paris avec trois centres dominants : Paris I, Paris Sorbonne et l'EHESS. Les thèses non parisiennes sont réparties sur une trentaine d'universités mais les 10 plus gros pôles universitaires représentent environ 30 % des thèses (Lyon, Bordeaux, Toulouse Aix-Marseille et Rennes viennent en tête, suivis de Grenoble, Strasbourg, Caen, Lorraine et Dijon), les 20 autres, environ 20 %.

Ces thèses portent majoritairement sur l'espace français (un peu moins de 60 %) dans sa dimension politique, économique et sociale la plus variée, et secondairement sur l'espace européen (environ 25 %, avec un tropisme italien évident : les thèses touchant au moins en partie l'Italie sont à peu près aussi nombreuses que celles qui portent sur Allemagne, la Grande Bretagne et l'Espagne réunies). Les autres parties du monde ne sont présentes que de façon résiduelle (5/6 % chacune).

D'un point de vue thématique, si l'histoire politique reste dominante, on note cependant un léger affaiblissement de celle-ci (16,5 % des thèses soutenues, 14,2 % des thèses en cours), de même que de l'histoire religieuse. L'histoire sociale et démographique, l'histoire de l'éducation et de la culture se maintiennent (autour de 13,5 %) tandis que l'histoire de la diplomatie, des relations internationales et de la guerre d'une part, de l'économie et des finances d'autre part progressent (respectivement de 8,1 % à 1 % et de 7,7 % à 9,2 %). Les équilibres entre les grands champs ne se modifient donc pas beaucoup, l'histoire diplomatique et des relations internationales prenant peut-être le pas sur l'histoire politique pour répondre aux demandes institutionnelles d'ouverture des recherches sur d'autres espaces que la France. Il faudra en revanche être attentif pour voir si le retour de l'histoire économique se confirme dans les prochaines années, ce qui mériterait d'être soutenu à l'heure où les économistes imposent des vues anachroniques sur l'économie des sociétés passées.

B. Histoire contemporaine

Il est très difficile de recenser précisément les grandes orientations de l'histoire contemporaine tant les entrées sont diverses et plus ou moins accessibles : nombre annuel de thèses soutenues, de candidatures au CNU, à l'Université, au CNRS... Prenons quelques points de repère à l'échelon national puis à celui du CNRS.

En prolongement du constat établi ci-dessus pour l'histoire moderne, à partir de la même source – et avec des réserves sur son exhaustivité et sa mise à jour –, l'histoire contemporaine représente environ 75 % des thèses soutenues en histoire depuis 2015 (plus de 1500) et de celles en cours de préparation depuis cette date jusqu'en 2019 (idem). Comme pour l'histoire moderne, trois pôles institutionnels dominent à Paris : Paris-1, Paris-Sorbonne et l'EHESS.

Si l'on se place du point de vue des demandes de qualification comme MCF au CNU (autour de 550 par an), leur nombre est relativement stable depuis 3 ans, tandis que le nombre de candidats issus de l'Union européenne augmente. En histoire contemporaine (soit moins de la moitié des dossiers soumis au CNU), la place de l'histoire politique reste prépondérante, même si celle-ci recule légèrement au profit de de l'histoire dite culturelle, tandis que l'histoire religieuse est en recul sensible.

Le nombre de candidats au concours de chargé de recherche au CNRS est en légère baisse (moins de 180 ces deux dernières années), sans doute en raison de la diminution du nombre de postes mis au concours et des exigences de ce dernier. Sur les 34 recrutements opérés entre 2015 et 2019, 19 le sont en histoire contemporaine et 4 à cheval entre histoire moderne et contemporaine (couvrant de fait plutôt le XIX^e s.). La répartition par domaine devient de plus en plus délicate en raison des approches croisées qui se multiplient : histoire politique et sociale, histoire de l'art et histoire culturelle par exemple. On peut toutefois avancer que l'histoire à dominante sociale a la part belle (17 projets de recherche relèvent d'études de sociétés), suivie par l'histoire culturelle (10), celle-ci recouvrant des dimensions sociales mais aussi artistiques ou relevant de la sphère intime ou familiale (2). Les domaines les moins représentés sont l'histoire économique (2) et l'histoire des sciences (1). D'une manière transversale, on relève une orientation marquée vers l'étude des circulations et des problématiques liées aux territoires et aux frontières.

Trois domaines en évolution nous paraissent mériter des approfondissements : l'histoire économique, l'histoire sociale et l'histoire politique.

1. L'histoire économique au milieu du gué

Depuis quelques années, les thèses d'histoire économique se stabilisent à la baisse, du fait de la diminution du nombre d'enseignants-chercheurs et de chercheurs recrutés en histoire économique et de la concurrence de l'économie historique et de la socio-économie, notamment en raison de leurs approches quantitatives et/ou de longue durée qui ont le vent en poupe dans les financements internationaux.

Rappelons brièvement que si l'histoire et la science économique sont historiquement liées, les deux disciplines se sont progressivement scindées en France en deux départements distincts, et que depuis deux siècles, leurs relations se sont avérées complexes, faites tantôt d'incompréhension ou d'ignorance tantôt de rapprochements et de coopérations fécondes. Si les historiens se familiarisent avec les outils, les concepts et les grilles de lecture des économistes et si des approches croisées émergent de part et d'autre, si les collaborations sont visibles dans des projets collectifs (ANR, colloques, ouvrages), le recrutement reste étroitement disciplinaire, dans un contexte de réduction des postes.

Pourtant dans les programmes de recherche nationaux ou internationaux, l'histoire économique est de plus en plus mobilisée à travers des approches croisant plusieurs champs (social, politique, environnemental) visant à renouveler l'histoire du capitalisme. Elle s'est ainsi ouverte aux débats actuels qui touchent à l'environnement, l'alimentation, l'agriculture, sans oublier la désindustrialisation et la financiarisation des économies. L'initiative en revient fréquemment à de jeunes chercheurs bien insérés dans des réseaux internationaux et pluridisciplinaires, familiarisés avec les outils quantitatifs (construction de base de données, analyse de gros corpus, de réseaux). La tradi-

tion historique française, attachée à l'exploitation rigoureuse de sources primaires et à la mise en contexte des données, pourrait tirer avantage à l'échelle internationale d'une double compétence méthodologique, alliant le travail critique sur les sources et le recours aux méthodes quantitatives.

2. Vers un renouvellement de l'histoire sociale ?

Le renouvellement de l'histoire sociale, visible notamment autour des activités de doctorants et de jeunes docteurs, ne concerne pas exclusivement l'histoire contemporaine, mais la touche particulièrement. Il passe par un jeune vivier qu'il faudra accompagner et soutenir dans les prochaines années. Il se traduit par une revisite d'objets traditionnels de l'histoire sociale – des institutions, des actions collectives, des individus et des groupes sociaux et de celles et ceux qui veulent les « réformer » – par de nouvelles approches qui, précisément, n'opposent pas l'individu et le collectif mais entrecroisent étroitement les différentes échelles. Parmi celles-ci, on peut citer l'approche par le territoire qui est une autre façon de relire le local/global, la micro-histoire et l'approche « macro » ou « meso » des sociétés. Souvent affirmée, l'approche des sociétés « par le bas » se réduit parfois à une lecture du bas par le haut, en raison des sources utilisées. Or, saisir les sociétés dans toutes leurs dimensions sociales nécessite de trouver, dans le silence qui accompagnent certaines catégories sociales, les sources qui peuvent permettre de les approcher.

Ce renouvellement du champ doit être accompagné d'un questionnement sur les multiples temporalités qui scandent la lecture des sociétés, dans des rythmes conjoints ou disjoints, parallèles et superposés qui jouent sur les dynamiques et les transformations des sociétés. À une attention particulière et renouvelée aux outils d'analyse quantitative s'ajoute une utilisation de sources issues de l'histoire des sciences sociales. Par exemple, les enquêtes sociologiques ou ethnographiques peuvent

être utilisées comme sources, parfois en articulation avec un terrain plus contemporain ou une « revisite ». Ces travaux portent une attention à l'articulation des échelles d'analyse, sur des terrains élargis à divers espaces (Afrique et Asie notamment), ce qui transforme en retour les recherches sur les terrains français ou européens.

Une attention spéciale doit être portée au renouvellement de l'histoire des mondes du travail, et plus particulièrement à celle des « désaffiliations », à la croisée des faits sociaux (marginalisations, exclusions), politiques (droits, désengagements militants...) et culturels, domaine qui soulève de nouveaux défis épistémologiques et méthodologiques. De même, une histoire des conditions de travail à la croisée de l'histoire des risques, des mobilisations savantes et sociales et de l'environnement, pourrait renouveler ce champ, en s'attachant à ses dimensions concrètes et matérielles autour de l'espace de travail.

L'histoire sociale se nourrit également de rencontres avec d'autres historiographies : l'histoire environnementale, l'histoire du genre, l'histoire de l'art, l'histoire du monde colonial et des décolonisations, l'histoire des sciences et des savoirs, l'histoire du droit, et de nouveaux objets au croisement de ces thématiques. Elle rencontre par exemple l'histoire des sociétés urbaines ou rurales qui s'inscrit dans des territoires en mutation depuis deux siècles. La difficulté de classer les travaux en cours ou récents, qui se situent de plus en plus souvent à la croisée de plusieurs écoles historiographiques et sont parfois issus d'autres sciences sociales, peut être considérée comme une preuve de leur renouvellement, cette « fertilisation » étant sans doute une opportunité pour l'histoire sociale.

Aborder les sociétés par des objets et non par des sujets, selon des temporalités longues, rend la réalisation de la recherche plus complexe. Cela oblige à prendre ces objets d'étude, surtout quand ils sont sensibles, avec d'autant plus de rigueur et de recul pour se démarquer d'une approche qui pourrait être mâtinée d'idéologie ou inscrite dans le discours dominant d'une lecture actuelle des sociétés.

3. L'histoire politique revisitée

Depuis le début des années 2010, un certain nombre de travaux programmatiques soulignent la capacité de l'histoire politique à être en prise avec de nouveaux enjeux, en particulier la nécessité d'étudier *le* politique davantage que *la* politique. Certains objets traditionnels ont fait l'objet de renouvellements au contact d'autres champs disciplinaires (l'histoire économique, la science politique, l'économie), par exemple une histoire transnationale des partis et des idées politiques (libéralisme, socialisme). De nouveaux fronts ont ainsi été ouverts en Allemagne et en Italie qui tendent à essaimer en France, tandis que des travaux récents ont ouvert des perspectives de recherche hors de l'Europe (aux Amériques par exemple). D'un côté, le politique entendu comme espace de régulation de la vie sociale, des relations de pouvoir, et faisant référence plus ou moins explicitement à un imaginaire collectif et/ou à une communauté institutionnalisée (État, région, institution supra ou internationale). De l'autre, dans la lignée de ce que Pierre Rosanvallon appelait dès 2003 « l'histoire conceptuelle du politique », une approche du politique par les concepts – l'égalité, la souveraineté, la démocratie, etc. – car c'est autour de la formation de ces concepts, de leurs mutations sémantiques, de leurs appropriations diverses par les acteurs et les institutions que l'on peut appréhender le mieux les systèmes de représentation qui commandent la façon dont une époque, un pays ou des groupes sociaux conduisent leur action et envisagent leur avenir.

Une autre piste intéressante récemment défrichée est celle de l'histoire institutionnelle du politique, qui nécessite de nouer un dialogue entre histoire politique, histoire sociale et droit. L'attention aux institutions et aux processus de fabrication des textes se retrouve dans de nombreux travaux à la croisée de l'histoire et du droit. Que ce soit en histoire moderne ou en histoire contemporaine, les approches de l'État par le politique se sont également avérées très stimulantes pour déconstruire un objet complexe et difficilement saisissable. Les travaux sur la construction des politiques publi-

ques reposant sur une perspective et des fonds d'archives multiscalaires s'inscrivent également dans cette dynamique.

C. Histoire de l'art

D'une manière générale, plusieurs éléments du constat rédigé par nos prédécesseurs pour le précédent rapport de conjoncture sont toujours d'actualité. L'écart entre la visibilité de l'histoire de l'art sur la scène publique et sa difficulté à se développer en tant que discipline dans le monde académique est toujours aussi sensible. Si les retombées de l'histoire de l'art intéressent un public toujours croissant et contribuent à l'économie de l'art et de la culture, à la différence d'autres pays voisins tels l'Allemagne ou l'Italie, l'histoire de l'art demeure en France une discipline fragile, non enseignée dans le secondaire (et donc sans CAPES ni agrégation), éclatée entre le monde académique et le monde muséal, entre universités et grandes écoles (École du Louvre, Institut National du Patrimoine) et entre Paris et province. Dans la quasi-totalité des cas, elle forme une composante minoritaire au sein d'UFR, de conseils d'écoles doctorales, de sections du CNU et du CNRS et peine à se faire reconnaître en tant que discipline.

En France, l'histoire de l'art est engagée dans un processus de profond renouvellement épistémologique et méthodologique faisant écho à des courants qui se sont accélérés depuis deux à trois décennies dont la *New Art History*, la *Bildwissenschaft* et les *Visual Studies*. En interrogeant la valeur sociale et culturelle de ses objets, indépendamment de leur valeur esthétique, en questionnant les modèles historiographiques dominants qui ont eu tendance à privilégier une histoire de l'art « par le haut » centrée sur les grands acteurs, les « beaux-arts » et les institutions les plus prestigieuses, la discipline a été amenée à un retour critique et réflexif sur ses fondements idéologiques et méthodologiques. L'histoire de l'art accorde désormais une place accrue à l'étude de la production, de la réception, de la circu-

lation et de la transformation dans l'espace social des artefacts visuels sous toutes leurs formes. La discipline a élargi sa palette d'outils conceptuels afin de questionner tous les types d'images et d'artefacts visuels présents dans les sociétés humaines en privilégiant leurs rôles et leurs fonctions en tant qu'expressions visuelles d'une culture. Avec la place croissante du visuel dans nos sociétés, il devient de plus en plus nécessaire d'affûter des outils d'analyse critique. Mais à la différence de la tendance anhistorique des *Visual Studies*, l'histoire de l'art tient à saisir les phénomènes liés aux usages et aux fonctions de l'image dans un cadre et une culture historique.

Cet élargissement de l'histoire de l'art s'est traduit plus récemment par de nouvelles approches et l'exploitation de nouveaux types de sources, sensibles dans les programmes de recherche en cours et par les travaux menés par de jeunes chercheurs, doctorants et post doctorants. On relève notamment :

– l'ouverture de la discipline à la globalisation qui a accéléré la critique du paradigme occidental fondé sur l'opposition hiérarchique entre art majeur/art mineur, forme et matière... Celle-ci se traduit notamment par une attention accrue aux phénomènes de transferts culturels, de mobilité, de circulations, de métissage, d'hybridation, de resémantisation des objets, des images et des concepts liés aux mondes de l'art. En revanche, l'étude des arts extra-européens en tant que tels n'a pas bénéficié du même élan. Les arts de l'Islam, les arts de l'Asie, du continent sud-américain, de l'Afrique, etc. comptent très peu de spécialistes en France, alors même que les collections publiques sont notables.

– Le renforcement du dialogue avec d'autres disciplines (anthropologie, sociologie, sciences cognitives...) et l'ouverture au domaine en plein essor des «cultures sensorielles» visant à étudier les relations entre sensations visuelles, auditives, tactiles, olfactives, dans la perception et la réception des artefacts.

– Une attention accrue aux rapports entre arts et sciences, au rôle de l'image dans la construction et le partage des savoirs scientifiques, à

l'argumentation visuelle et aux limites de l'image comme preuve.

– Depuis le «visual turn» identifié dans les années 1990, l'histoire de l'art a élargi ses questionnements au domaine des images (fixes comme animées), à leur omniprésence croissante et à leurs fonctions et usages dans nos sociétés. Sans doute en contrepoint à ce tournant visuel, maintenant relativement bien acclimaté en France, la question de la matérialité opère un remarquable retour en force. Programmes de recherches, publications, colloques se multiplient, symptômes d'un champ en plein essor.

– En se fondant sur les avancées de la science des matériaux, le courant récent de la *Technical Art History* milite pour un rapprochement entre sciences appliquées, sciences de la conservation et histoire de l'art. Les technologies actuelles d'imagerie spectrale, les analyses physico-chimiques de la matière enrichissent considérablement la compréhension de l'objet physique, tant du point de vue de ses composants matériels que des traces qu'il porte de son histoire et de ses avatars à travers le temps et l'espace.- Le domaine, en plein essor à l'étranger, des *Art Market Studies* peine à se développer en France, sans doute faute de formation permettant de croiser les outils de l'histoire de l'art et ceux de l'économie et de l'économétrie. Ayant toujours compté parmi les facteurs déterminants de la capacité de production des artistes, de la circulation et de la réception des œuvres, le marché commence à être reconnu comme un objet d'étude en soi, ce dont témoigne l'émergence de travaux récents.

- Enfin, le tournant numérique est à l'origine d'une série de bouleversements dans les usages et les pratiques de la discipline. Outre les analyses quantitatives offertes par les bases de données, des usages plus spécifiques à l'histoire de l'art tendent à se développer : base d'images numérisées, restitution 3D d'artefacts disparus, démantelés ou endommagés, reconnaissance de formes (apprentissage automatique, IA). Le développement de ces approches est en forte demande auprès des jeunes chercheurs, mais il se heurte en France à un

manque de moyens pour former et/ou accompagner les chercheurs (manque d'ingénieurs en infographie, en 3D, en *deep learning*, mise en place de cursus de formation à l'université).

Le nombre de postes de maîtres de conférences ouvert à l'université est resté stable et faible avec une moyenne d'environ 5 par an pour les périodes modernes et contemporaines, avec le plus souvent un déséquilibre en faveur de la période contemporaine. On notera que le nombre de postes de professeurs en histoire moderne a chuté de manière drastique, ce qui risque de poser des problèmes d'encadrement de doctorants : deux postes seulement entre 2016 et 2019, alors qu'il y en a eu pour 8 l'art contemporain.

Dans le précédent rapport de conjoncture, les rédacteurs avaient attiré l'attention sur la politique territoriale du CNRS, comme un point particulièrement alarmant. Les deux seules unités CNRS où l'histoire de l'art domine sont situées à Paris (une UMR, le centre André Chastel, et une USR, InVisu), tandis que le nombre de chercheurs implantés en région décroît. Aujourd'hui, la situation s'est sensiblement aggravée et le nombre de chercheurs en histoire de l'art actifs en région est réduit à la portion congrue. On les trouve, semble-t-il, réduit à un seul élément à Tours (CESR) et à Toulouse (FRAMESPA), et à deux éléments à Dijon (Centre Georges Chevrier), alors qu'ils sont plus d'une douzaine à Paris. La concentration des chercheurs en histoire de l'art dans les unités parisiennes est dommageable car elle renforce le centralisme parisien dont souffre la discipline, avec la présence de l'INHA, des 2 seules UFR et écoles doctorales en histoire de l'art, des grands musées et des bibliothèques spécialisées. On ne peut que regretter la faible participation du CNRS aux dynamiques intellectuelles qui se développent dans les laboratoires hors de Paris, situation qui ne laisse pas d'intriguer les collègues étrangers.

Ces dix dernières années, 10 chercheurs en histoire de l'art ont été recrutés par le CNRS. On relèvera que les aires culturelles ont été les mieux pourvues, en cohérence avec la politique de soutien aux études aréales portée

par le CNRS, tandis que l'histoire de l'art moderne – hors renaissance italienne – et l'histoire de l'art très contemporain restent les parents pauvres.

D. Les aires culturelles

Sans en refaire l'historiographie, nous proposerons une définition englobante du terme convenu d'« aires culturelles » comme désignant des sociétés pensées d'abord dans leurs territoires et dans leur extrême diversité religieuse, économique, sociale ou, entre autres, linguistique mais que l'essor des études prenant en compte les mobilités, les rencontres et les phénomènes d'hybridation permet aussi de percevoir et d'analyser de façon décentrée et connectée. Le périmètre spatial de ces « aires culturelles » est complexe à définir, et *largo sensu* inclut toutes les sociétés hors de l'Europe de l'Ouest. Les études aréales ont acquis une réelle légitimité, due en partie au succès de l'histoire globale ainsi qu'à la capacité des histoires produites sur ces aires à produire des analyses théoriques et réflexives. Les dossiers présentés au concours montrent que les notions d'analyse « transnationale », la nécessité de penser une histoire « à parts égales » infusent désormais la recherche française. Néanmoins, il est bon de rappeler que l'histoire n'a pas besoin d'être toujours connectée ni globale, et que les historiens de l'Asie, de l'Afrique, de l'Amérique Latine, peuvent aussi produire une recherche ne portant que sur les sociétés qu'ils étudient, sans avoir besoin de justifier leurs efforts par un éclairage jeté sur l'histoire européenne.

Si la section 33 accueille traditionnellement les recherches dites aréales, ce capital scientifique ne peut être exclusivement maintenu et développé au sein de cette seule section. La section 32 a ouvert son périmètre pour rééquilibrer cet effort et prendre en compte les travaux d'études aréales portant sur les périodes anciennes, même si 3 CR travaillant sur l'histoire ancienne et médiévale de l'Asie ont été recrutés par la section 33 depuis 2015. Au-delà,

il nous semble nécessaire que d'autres sections, comme la 35 (philosophie, littérature, arts), la 36 (sociologie), la 40 (science politique) et la CID 53 (sciences et histoire) ouvrent leur périmètre aux chercheurs travaillant sur d'autres parties du monde que l'Europe occidentale. Les coloriages «aires culturelles» pourraient ainsi être ventilés avec profit sur l'ensemble des sections de l'INSHS.

Une autre condition propice à la prise en compte des caractéristiques des études aréales serait que les concours de l'agrégation et du CAPES d'histoire portent plus souvent sur des aires extra-européennes, ce qui favoriserait l'enseignement de l'histoire des aires culturelles et la production de manuels et participerait à désenclaver la culture générale des historiens de toute génération.

Par ailleurs, les conditions permettant à de jeunes docteurs de maîtriser pleinement les enjeux d'une recherche sur des aires extra-européennes doivent être soulignées. Il s'agit en effet de maîtriser une et souvent plusieurs langues (langues anciennes, langues vernaculaires, mais aussi langues européennes variées pour accéder aux archives), ainsi que des méthodologies souvent érudites (philologie, épigraphie, paléographie, etc.) et/ou liées à la pratique du terrain (collecte de données, entretiens, SIG, etc.). Il est important de rappeler que les formations en langues «rares», déjà faibles en France, se verront bientôt amputées par la fermeture prévue de l'École des Langues et Civilisations de l'Orient Ancien (Institut Catholique de Paris). S'il est nécessaire d'atteindre une masse critique afin qu'un champ du savoir puisse exister, alors cette masse critique ne peut être qu'internationale, surtout dans des domaines où il y a peu de spécialistes. Les formations sont donc longues et les thèses peuvent difficilement être réalisées en trois années. L'injonction de recruter au plus près de la thèse pose aussi problème pour de jeunes chercheurs devant maîtriser des compétences aussi variées, par rapport à des candidats travaillant sur des aires culturelles plus faciles d'accès. Il y aurait des avantages à développer des codirections et cotutelles de thèse pour

permettre que s'associent des expertises sur les terrains et des spécialités.

Institutionnellement, la recherche française s'est dotée des GIS études aréales qui sont devenus en quelques années des structures partenariales privilégiées, tissant du lien entre les communautés et fédérant les initiatives. Le socle sur lequel se base la recherche aréale demeure les instituts de recherche français à l'étranger (USR, UMI et UMIFRE, International Research Projects), pleinement soutenus par le CNRS, qui offrent une plateforme d'échange entre chercheurs d'horizons très divers, disciplinaires et nationaux et qui facilitent l'accès aux terrains. Rappelons que depuis 2012, des contrats financés par le CNRS permettent à des doctorants de développer leur travail doctoral au sein des UMIFRE.

La possibilité d'effectuer des séjours de recherche à l'étranger plus ou moins longs tout au long de la formation et de la carrière est cruciale, aussi bien en histoire moderne qu'en histoire contemporaine. Pourtant, certains points peuvent freiner la réalisation des terrains de recherche. Il y a tout d'abord l'approbation des missions par le/la fonctionnaire défense du CNRS, qui se fonde sur les zones à risque définies par le MAEDI avec une part d'imprécision qui est parfois regrettable. D'autre part, les dispositifs de soutien financier se sont multipliés : affectation, mission longue durée, soutien à la mobilité internationale, bourses Marie-Curie. Le poids administratif de ces dispositifs peut s'avérer lourd, par exemple avec l'introduction d'un nouveau questionnaire pour les chercheurs cumulant plus de 90 jours de terrain dans l'année, ou l'instauration d'une politique de *per-diem* qui augmente le coût des missions de longue durée par rapport aux frais réels. Enfin, il semble important de souligner le peu de poids des institutions de recherche françaises dans les discussions avec les consulats français pour soutenir les demandes de visa des collègues extra-européens qui se les voient régulièrement refuser, compromettant les collaborations et projets en cours.

L'accès aux ressources et aux fonds spécifiques des bibliothèques spécialisées avait déjà connu un moment de regroupement avec la

création de la BULAC en 2011. L'ouverture prochaine du GED sur le Campus Condorcet à Aubervilliers va marquer un second moment de fusion des fonds documentaires spécialisés, qui devrait rendre plus facile l'accès aux ressources.

L'évolution des problématiques scientifiques et des champs thématiques selon les aires culturelles se décline ainsi :

- les études ottomanes sont particulièrement dynamiques ;

- si l'histoire du Maghreb par les sources arabes est stable, en revanche l'histoire coloniale sur cette aire se développe ;

- en ce qui concerne l'histoire de l'Afrique, il faudrait renforcer l'histoire de la période moderne, encore trop peu développée malgré un renouveau marqué de l'identification de sources encore peu ou pas exploitées. L'histoire de l'Afrique de l'Ouest et de l'Est est désormais relativement bien couverte, tout particulièrement en histoire sociale contemporaine (et même ultra-contemporaine), avec une prise en compte des études de genre. L'Afrique australe et centrale reste des sous-régions peu travaillées par la recherche française ;

- Asie orientale : les recrutements sont loin de compenser les départs en retraite. Les universités recrutent de moins en moins de spécialistes des périodes antérieures au ^{xx}e siècle ;

- pour l'Asie du Sud, on observe qu'il n'y pas eu de recrutement en histoire au CNRS depuis 2012 ; les chercheurs en poste travaillent essentiellement soit sur la période moderne via les sources persanes ou européennes soit sur la période coloniale à partir des archives européennes. Il y a donc des lacunes pour la période pré-moderne comme pour l'histoire post-coloniale (post-1947). La prédominance des contemporanéistes s'accroît encore dans la jeune recherche, qui exploite prioritairement des sources textuelles coloniales ;

- en ce qui concerne l'histoire des Amériques, elle est marquée par un relatif équilibre entre histoire moderne et contemporaine, par l'essor des recherches sur l'Amérique du nord

et par un dialogue fructueux entre latino- et nord-américanistes ;

- enfin, la montée de travaux sur les circulations Sud-Sud montre aussi le besoin d'une histoire transcendant des frontières ou des groupements géographiques convenus, pour valoriser des études transnationales basées sur des circulations d'idées et d'alliances politique, économique et militaire, dans le cas des pays non-alignés par exemple.

La surreprésentation de la période contemporaine dans les études aréales va peut-être de pair avec la montée de la demande d'expertise et la chute des travaux en histoire moderne. Les profils les plus érudits exigeant un lourd investissement méthodologique et linguistique ne sont plus valorisés sur le marché de l'emploi, et en conséquence, ces parcours sont délaissés par les étudiants. Le CNRS doit là encore jouer son rôle conservatoire au niveau du recrutement, ce qui est en partie réalisé, et il doit également accompagner plus largement au niveau institutionnel ce type de recherche.

E. Les études postcoloniales

La tendance au désenclavement des historiographies, à l'ouverture aux mondes extra-européens, déjà signalée dans le rapport de conjoncture 2014, se confirme pleinement sur la période 2014-2019. Entre 2007 et 2013, les projets des candidats lauréats du concours de chargé de recherche concernaient à 54 % les mondes extra-européens, proportion qui s'élève à 62,5 % pour les sessions 2014-2019 (effectifs : 40), si on considère les sujets partiellement européens, mais seulement 45 % si l'on considère les projets exclusivement extra-européens. La ventilation de ces 62,5 % fait apparaître une prédominance pour l'Afrique (20 %), suivi de près par les Amériques (17,5 %), puis l'Asie et la Méditerranée-Moyen-Orient-Proche-Orient (12,5 % chacune).

Le classement alternatif des aires géographiques proposé ici confirme d'ailleurs la difficulté croissante à répartir des approches de

plus en plus impériales, connectées, croisées ou globales – ce dont on ne peut que se réjouir, à condition toutefois que ce phénomène corresponde chez les candidats à une réelle nécessité. De manière complémentaire, on note une tendance à décloisonner les périodes pré ou post-coloniales de la période coloniale, à déconstruire les cadres d'analyse hérités des passés impériaux, à proposer des approches qui transcendent et dépassent ces cadres.

Les thèses portant sur le colonial ou le post-colonial sont en pleine expansion : 97 thèses, soit respectivement 55 soutenances sur le colonial et 42 sur le post-colonial pour 2015-2019, contre 69 pour la période 2010-2014. L'intérêt pour les approches postcoloniales, qu'il soit critique ou non, ne s'est pas démenti sur la période la plus récente, même si ce champ est encore nettement dominé par les approches littéraires, textuelles ou anthropologiques. Se maintient un intérêt pour le thème de l'esclavage, avec 41 thèses soutenues comportant ce mot-clé et la confirmation de la place des approches historiques au sein des sciences sociales.

III. Nouvelles sources et nouvelles écritures de l'histoire

A. La source orale, une reconnaissance traditive

Depuis quelques années, les programmes de recherche présentés au concours de chargé de recherche font appel de plus en plus fréquemment au témoignage oral comme une source d'archives à part entière ou comme une source d'appoint. La source orale est ainsi souvent mobilisée pour les travaux d'histoire politique, économique, sociale,

culturelle, en histoire de l'art et pour les recherches de « terrain » par exemple dans les aires culturelles. Pour ceux qui la maîtrisent et qui ne la considèrent pas comme un ersatz, il s'agit véritablement d'une approche méthodologique et épistémologique pour analyser des discours provoqués, construits et recueillis. La source orale amène souvent à reconsidérer d'autres matériaux soit pour les conforter, soit au contraire pour questionner le discours dominant ou normé. Elle renouvelle les perspectives sur l'histoire des représentations, des discours, de la mémoire comme celle de la vie quotidienne ou l'étude de parcours biographiques ainsi que les questions qui prennent le territoire et l'environnement comme une entrée pour l'histoire sociale et l'histoire des sociétés.

Le recours à ce type de source ne doit pas toutefois se substituer à l'exploitation d'archives écrites de graphies, d'accès ou de langues difficiles mais au contraire être considéré dans une confrontation stimulante entre différentes catégories d'archives et de discours produits. Elle sert d'ailleurs bien davantage à aborder les représentations que les témoins se font de leur passé qu'à être une entrée pour des faits de ce même passé, même si parfois c'est la seule manière d'y accéder.

Si la section salue la reconnaissance d'une source à part entière pour l'histoire contemporaine, comme en témoigne le carnet de recherche « Histoire orale et archives orales », elle souhaite attirer l'attention sur la rigueur méthodologique et déontologique et sur l'approche réflexive qui doivent impérativement accompagner tant l'identification des corpus de témoignages et les circonstances précises de leur recueil, que l'exploitation qui est faite d'une source provoquée, c'est-à-dire où le collecteur est lui-même partie prenante du récit, sans parler des niveaux de temporalités différenciés entre le contexte de recueil et celui de la période étudiée.

Distinctes de la source orale décrite ci-dessus, qui s'inscrit dans la mémoire sociale des acteurs, les traditions orales à proprement parler permettent de documenter des périodes plus anciennes et sont transmises de façon

beaucoup plus formalisée. Elles se rencontrent plus souvent dans des sociétés à littéracie réduite ou dans des sociétés marginalisées, que le tournant du millénaire et la globalisation des communications fragilisent. Malgré cette urgence à les recueillir, elles sont aujourd'hui le parent pauvre des enquêtes orales en histoire.

B. Un renouvellement des sources de l'histoire : l'image fixe ou animée

Mise au goût du jour par Haskell (1993) mais souvent reléguée au statut de simple illustration, l'image revient en force comme donnée à part entière de la recherche en histoire contemporaine. Dans le sillage des médiévistes qui s'en sont saisi pour questionner la force politique des représentations figurées (Boucheron, 2013) ou la fonction mémorielle de l'art religieux (Schmitt, 2002), les jeunes contemporanéistes s'avèrent de plus en plus sensibles aux potentialités heuristiques des données visuelles, et en particulier à celles fournies par les nouveaux média que constituent la caricature, la photographie, le cinéma ou encore la bande dessinée (par ordre d'apparition chronologique).

C'est ce qui ressort des projets de recherche à dimension visuelle (hors histoire de l'art) soumis au concours CR depuis 2017, soit une dizaine de candidatures en moyenne chaque année. Le panorama des sources visuelles mobilisées est large : y trouvent leur place aussi bien la bande dessinée de reportage, la photographie aérienne, le portrait photographique de studio, le documentaire institutionnel, ou encore le film de fiction et l'émission télévisuelle.

Le pari fait dans tous les cas est de tenter d'approcher par le biais de l'image fixe ou animée des phénomènes, des situations, des organisations, des interactions, dont les sources textuelles ne disent à peu près rien, ou très peu. La difficulté n'est pas triviale : l'histoire contemporaine par l'image présuppose en

effet une grande inventivité méthodologique, étant donné que les outils permettant de traiter des données visuelles de manière sérielle, via la reconnaissance automatique de l'image par exemple, sont encore balbutiants. L'indexation des images animées n'est pas non plus aisée. Les techniques de modélisation visuelle (modèles 3D) sont, de leur côté, peu accessibles aux chercheurs individuels. En retour, il y a là des perspectives de collaborations interdisciplinaires fructueuses, avec les spécialistes des sciences de l'information en particulier, et à un horizon plus lointain, un terrain d'expérimentation fécond pour l'intelligence artificielle.

Que ce soit dans le traitement des sources écrites "traditionnelles", des sources orales ou des sources visuelles, historiens et historiennes dialoguent avec des spécialistes d'autres disciplines. D'une part, les méthodes historiennes, avec leur rigueur, peuvent être utiles à d'autres dans le traitement des sources écrites ou orales. D'autre part, le dialogue peut enrichir les pratiques historiennes, par exemple dans le traitement des entretiens. Pour autant, la pluridisciplinarité et l'interdisciplinarité n'ont rien d'évident.

C. De la pluridisciplinarité et de l'interdisciplinarité

1. La difficile pratique de la pluridisciplinarité

Depuis que les différents programmes de recherche – les ANR mais surtout ceux lancés par les différentes structures (Idex, Labex, Equipex...) et désormais les ERC – nourrissent une grande partie de la recherche en cours, la pluridisciplinarité, déjà à l'œuvre dans d'autres contextes (GDR, RTP, ou auparavant, PIRs dont PIREN, PEVS...) est un passage obligé, si ce n'est dans les actes et la réalité des programmes, en tous cas dans les affichages. Tandis que la démarche de l'École des Annales en quête d'une histoire totale entendait s'en inspirer, celle-ci avait été expérimentée très largement dans un certain nombre d'universi-

tés dès les années 1970, qui mettaient en œuvre des séminaires de formation ou des programmes de recherches associant dans le domaine des SHS, histoire, anthropologie, économie, sociologie, géographie ou d'autres configurations en fonction des thématiques ou des sujets.

Cette pluridisciplinarité a été et reste féconde pour questionner des objets de recherche comme des sujets d'étude. Mais elle ne peut s'exonérer de questionnements quant aux termes, méthodes, approches entre des disciplines qui peuvent sembler proches et similaires. À l'expérience, cette proximité entre sciences humaines et sociales n'est pas toujours réelle et, varie d'une discipline à l'autre et, pour stimulante qu'elle soit, elle doit être scientifiquement éprouvée. Pour cela, la pluridisciplinarité doit s'inscrire dans un véritable dialogue entre disciplines et nourrir les approches réciproques de chercheurs via l'utilisation de concepts empruntés à d'autres.

Si c'est à l'échelle de la formation que les difficultés méthodologiques peuvent être résorbées le plus aisément, l'écueil persiste au moment des recrutements, presque toujours centrés sur la discipline – de surcroît en période de pénurie de postes. L'enjeu pour les jeunes chercheurs se situe dans une maîtrise et une connaissance bibliographique et épistémologique des autres sciences sociales, afin d'être reconnus par les disciplines connexes. La pluridisciplinarité semble ainsi plus aisée à se réaliser dans des recherches de maturité et des projets collectifs. Là encore, des décalages persistent. Si au sein de certaines disciplines connexes comme l'économie, l'« invisibilité » des travaux historiques non quantitatifs demeure forte, d'autres, comme la sociologie, l'anthropologie ou la science politique, s'inspirent en revanche très largement de recherches en histoire contemporaine.

2. Les voies discrètes de l'interdisciplinarité

Les nouvelles orientations scientifiques qui incitent au rapprochement entre des disci-

plines lointaines autour des grandes thématiques – santé, environnement par exemple – sont elles aussi stimulantes et désormais nécessaires dans les questionnements autant scientifiques que sociétaux qu'elles suggèrent. Pourtant, si cette interdisciplinarité nouvelle est féconde et doit être approfondie dans les programmes collectifs, il est sans doute encore difficile pour de jeunes chercheurs de maîtriser à la fois des domaines aussi éloignés que la chimie et l'histoire ou la pharmacie et la psychologie, la physique et la science politique.

Cette nouvelle interdisciplinarité oblige à une remise en cause de nos approches disciplinaires et à un renouvellement fécond de nos questionnements. C'est aussi une manière de refonder les disciplines dans leur spécificité et leurs apports respectifs, tant pour les méthodes que pour les connaissances, pour que les rapprochements n'aboutissent pas à un discours général et affaibli – voire à un vernis de science sociale servant à légitimer des recherches autrement difficilement accessibles aux citoyens et citoyennes – qui serait la négation même de la richesse espérée.

On peut toutefois noter que bon nombre d'historiens des sciences et des techniques ont acquis, en cours de carrière si ce n'est pendant leur formation, des compétences dans les sciences du vivant, les sciences de l'univers, les mathématiques... qu'ils mettent en œuvre dans leurs travaux. On peut ici parler d'une interdisciplinarité « discrète », illustrée entre autres par les travaux actuels sur les collections scientifiques constituées entre le XVII^e et le XIX^e siècle. Ces dernières années, le « tournant matériel » puise dans ces pratiques de recherche pour situer le travail sur un terrain interdisciplinaire, où des projets peuvent jouer un rôle pilote et assurer une visibilité internationale. Citons l'exemple de l'analyse physico-chimique d'objets conjuguée avec le dépouillement d'archives dans l'étude de la circulation de certaines techniques artisanales et artistiques, qui fait actuellement l'objet d'un IRP franco-chinois. L'histoire de l'art fait également appel de manière croissante à ce type de méthodes.

D. Les Humanités numériques en histoire moderne et contemporaine : en progrès

Suite à une enquête menée auprès des directeurs et directrices d'unités, le dernier rapport de conjoncture du comité national (2014) dressait un bilan en demi-teinte de l'intégration des « Humanités numériques » (HN) en histoire. S'il soulignait une sensibilisation générale de la communauté historienne aux problématiques (utilisation et création de bibliographies et de bases de données en ligne, valorisation de la recherche, archivage des données), il pointait aussi du doigt le retard français dans le domaine, le manque de moyens financiers et humains alloués, un manque d'offre de formation spécifique à destination des étudiant(e)s et chercheurs/chercheuses – qui se forment surtout sur le tas –, des inventaires d'archives encore trop peu informatisés, enfin un manque de visibilité des grandes infrastructures du type Huma-num.

En cinq ans, on note une amélioration sensible sur ces différents points, du fait que les HN ont été davantage intégrées aux priorités nationales : voir par exemple, sur la question de la formation, le déploiement en cours des PUD (plates-formes universitaires de données) de PROGEDO (une des 18 TGIR françaises), en lien avec le réseau national des MSH, en passant par la multiplication des offres de masters HN et l'ouverture de filières HN au niveau de la Licence. Les infrastructures numériques d'appui gagneront toutefois à être encore davantage connues et reconnues, notamment du point de vue des moyens financiers et humains.

Au niveau des stratégies collectives de recherche, la diffusion des pratiques numériques se poursuit, notamment à travers la création de pôles HN ou d'histoire numérique dans les grandes universités de province, avec une ouverture croissante sur l'international – cf. la création du *Consortium Data for History* sur les questions d'interopérabilité des données géohistoriques dans le web sémantiques (2017), et

la prise en compte des HN outre-mer, qui participe du décloisonnement géographique. Toutefois, ces stratégies n'ont pas encore totalement irrigué les activités historiennes de recherche.

Plus spécifiquement et peut-être plus fondamentalement, les historiens entrent dans une ère de co-construction des corpus avec les archivistes, qui pose la question du rôle et des compétences de chacun (cf. *Gazette des archives*, « Le goût de l'archive à l'ère numérique », 2019). Au-delà, l'avènement d'une société numérique connectée offre des opportunités de recherches collaboratives sans précédent, ce que l'on peut aussi voir comme une forme d'ubérisation des archives.

Les changements de métier liés à l'essor des humanités numériques ne sont pas propres au monde historien, mais ils ont des incidences particulières dans le rapport aux sources et dans l'écriture de l'histoire qu'ils entraînent. En raison des nouveaux outils créés grâce au numérique, et de nouvelles sources ainsi provoquées, les historiens sont incités à faire évoluer la nature des productions scientifiques : par exemple, bases de données, atlas, simulations et reconstitutions d'environnements disparus ; on pense notamment à la multiplication des projets, souvent participatifs, s'inspirant du *Venice Time Machine*, à Paris et dans certaines grandes villes universitaires, comme Lyon, Toulouse ou Nancy. La numérisation d'archives permet certes l'accès à des sources d'archives éloignées géographiquement et facilite donc le croisement de sources, bénéfique non négligeable en ces temps de pénurie. Cela peut conduire à opter pour des écritures nouvelles, plus courtes, fondées en priorité sur des sources numérisées et à délaisser des pans entiers d'archives non numérisées, moins faciles d'accès et à biaiser ainsi les travaux historiens.

Surtout, la spécificité et l'originalité de la discipline historique repose sur son absence de formalisation, de langages, de procédures, de cadres théoriques partagés. Comment rendre compatible cette diversité de pratiques avec une formalisation et une standardisation des procédures et des outils conceptuels (Ph. Rygiel, 2017)? De fait, la plupart des

recherches historiennes sont réalisées à partir de données qui ne sont pas numériques à l'origine, ce qui pose le problème spécifique d'une modélisation – qu'elle soit quantitative ou non – à partir de traces imparfaites de mondes en évolution, qui n'ont pas pour fonction première de servir de support à une enquête numérique : à nouveaux outils, nouvelles perspectives heuristiques.

Inversement, on peut noter la consolidation d'une histoire du numérique très contemporaine qui repose sur des archives nativement numériques (*born-digital heritage*, le dépôt légal de l'internet français existant depuis 2006). Elles participent de ces nouvelles sources que l'on a vu à l'œuvre lors de l'émergence de l'histoire orale, de la radio ou des études d'histoire du cinéma. Mais même pour ce type d'approche, la contextualisation (pratiques et usages, lieux et équipements), notamment par les sources écrites papier, demeure un complément indispensable ; des questions méthodologiques spécifiquement numériques sont à prendre en compte (évolution des langages et des formats, incomplétude des captations des données vivantes du web), tandis que les risques de biais historiographiques et bibliographiques sont réels. Ainsi, tandis que la numérisation du métier est en progrès, dans un contexte de forte concurrence sur le marché du travail des post-doctorants, l'intégration des HN aux projets présentés par les candidat(e)s au concours de chargé(e) de recherche est devenue un lieu parfois trop commun, i.e. mal articulé à la complexité des sujets.

Enfin, la diffusion du savoir se caractérise par une « ubiquité » croissante et une massification : il est désormais beaucoup plus facile qu'il y a quelques années de réaliser un site internet permettant la diffusion des résultats des recherches individuelles ou collectives. Le succès rencontré par le site *hypotheses.org* s'est largement confirmé depuis le dernier rapport de conjoncture : on compte en 2016 – toutes disciplines confondues, beaucoup de projets étant d'ailleurs inter ou pluridisciplinaires – plus de 2 000 carnets de recherche ; mais ceux-ci confirment largement la traditionnelle macrocéphalie francilienne de la recherche en SHS.

Côté édition-diffusion toujours, l'histoire et l'histoire de l'art représentent 17 % des sites de revues françaises inaugurées en 2016 sur OpenEditions, près de 18 % des ressources disponibles sur HAL en 2019, et une proportion très conséquente des revues les plus consultées sur Persée.

Enfin, la multiplication des bases de données ouvertes a conduit à une directive européenne sur le règlement général sur la protection des données (RGPD), qui soumet les chercheurs en sciences humaines et sociales à de nouvelles exigences, dont il ne faut pas négliger l'impact. Les historiens se doivent d'être particulièrement vigilants sur ce point.

E. Publications scientifiques et accès aux ressources

Pour que la recherche française puisse exister sur la scène internationale, il est désormais admis que la langue de publication ne peut plus être majoritairement le français. L'anglais est devenu la langue incontournable dans les productions scientifiques et un effort net a été fait pour les publications historiennes en anglais. Toutefois, il existe encore trop peu de personnels de soutien à l'apprentissage de l'anglais académique (oral et écrit) et d'aide à la traduction. Les laboratoires ne peuvent guère, sur leurs fonds propres, prendre en charge l'énorme tâche de traduire ou d'éditer les textes de leurs membres et de leurs doctorants. Enfin, publier dans d'autres langues que l'anglais mérite d'être soutenu par les institutions, notamment dans les langues locales, vecteur essentiel de reconnaissance pour les spécialistes des aires culturelles.

Par ailleurs, il serait souhaitable que l'accès aux ressources numériques, par le biais des abonnements institutionnels aux bouquets numériques, devienne encore plus lisible, même si l'effort mis sur la publication en *open-access* et la montée en puissance de OpenEditions ont permis de rendre plus accessibles les productions scientifiques. Ceci

contrebalance la disparition progressive des anciennes coopérations éditoriales basées sur l'économie papier. Pourtant, des voix s'élèvent dans les pays dits « du Sud » pour mettre en garde contre la possibilité d'une captation numérique de leurs ressources intellectuelles par les pays « du Nord ». La communauté historique doit veiller notamment à ce que les

opérations de « sauvegarde » par la numérisation des sources premières de l'histoire de pays actuellement en transition numérique ne se fassent pas entièrement avec les financements, les ressources et les moyens de préservation et de communication des pays ayant acquis la pleine maîtrise de l'économie numérique.

Note

(1) Recension faite à partir de theses.fr qui n'est pas exempt de défauts et pas toujours actualisé, les critères inscrits dépendant des universités et des écoles doctorales, sans aucune homogénéisation. Ce site permet cependant d'avoir une idée, même

imprécise, des grandes tendances actuelles dans lesquelles les enseignants chercheurs et les chercheurs orientent les doctorants.

SECTION 34

SCIENCES DU LANGAGE

Composition de la section

Nabil HATHOUT (président de section), Thomas PELLARD (secrétaire scientifique), Enoch OLADÉ ABOH, Marta ABRUSAN, Evangelia ADAMOU, Anne-Marie ARGENTI, Gabriel BERGOUNIOUX, Elisabetta CARPITELLI, Carlo CECCHETTO, Maud CHAMPAGNE-LAVAU, Pascal DENIS, Caterina DONATI, Urtzi ETXEBERRIA, Beatrice GODART-WENDLING, Jean-Remy HOCHMANN, Giancarlo LUXARDO, Christoph REINTGES, William SAYER, Rudolph SOCK, Benjamin SPECTOR, Ali TIFRIT.

Résumé

La section 34 se consacre aux sciences du langage. Elle couvre un ensemble étendu de sous-domaines : phonétique ; phonologie ; morphologie ; lexicologie et lexicographie ; syntaxe ; sémantique ; pragmatique ; discours, texte et dialogue ; philosophie du langage ; évolution du langage ; typologie et diversité des langues ; linguistique historique et comparative ; sociolinguistique, contact de langues et dialectologie ; psycholinguistique et neurolinguistique ; acquisition du langage ; traitement automatique du langage naturel et linguistique informatique ; linguistique de corpus ; histoire de la linguistique. Il a semblé utile d'ajouter une section sur la démographie des chercheurs rattachés à la 34 et sur celles des ITA affectés à des laboratoires relevant de la 34.

Introduction

Les sciences du langage s'intéressent au langage comme capacité humaine universelle, intimement liée à des processus cognitifs et à des processus sociaux. Ce sont les caractères structurels du langage ainsi que les processus généraux qui en régissent l'emploi, notamment dans la communication humaine, qui constituent le cœur des sciences du langage et font l'objet notamment des recherches en linguistique théorique et formelle. L'universalité du langage va de pair avec la diversité des langues naturelles. L'une comme l'autre sont des sujets de recherche importants de la discipline tout comme l'évolution du langage et la diversification diachronique, diatopique, diamésique et

sociale des langues. La recherche en sciences du langage s'attache à préserver les capacités réflexives et critiques sur toute question impliquant la fonction, les usages et les effets des langues dans la société afin de contribuer à une information documentée et à des prises de décision éclairées.

Si les sciences du langage partagent une partie de leur périmètre avec les sciences cognitives, les neurosciences, l'informatique et les sciences de l'éducation, elles gardent une forte spécificité liée à la place première qu'elles accordent aux langues et au langage. La proximité avec ces disciplines est de plus en plus importante du fait notamment du recrutement de chercheurs pluridisciplinaires qui entraîne une évolution notable vers les approches expérimentales avec la généralisation de l'utilisation de gros corpus, de modèles informatiques, de bases de données et compte tenu de la place prise par les travaux en psycholinguistique, neurolinguistique, sociolinguistique dans toutes les spécialités détaillées dans la suite de ce chapitre. Les sciences du langage, discipline relativement jeune, deviennent ainsi plus mûres.

Comme toutes les sciences où l'approche expérimentale occupe une grande place, les sciences du langage sont confrontées à une crise de la reproductibilité des résultats notamment en psycholinguistique et neurolinguistique, mais aussi à un problème de qualité des jeux de données dans beaucoup de tâches en traitement automatique des langues. La réponse à ces difficultés passera probablement par une plus grande standardisation des dispositifs expérimentaux conçus et utilisés en sciences du langage. Cependant, l'un des plus grands défis auquel les sciences du langage vont devoir faire face à court et moyen terme vient de l'intelligence artificielle où le traitement des données langagières occupe une place centrale. Les systèmes fondés sur l'apprentissage automatique sont de plus en plus performants et devraient atteindre rapidement une qualité dans le traitement de ces données proches de celle des humains. La difficulté

vient du fait que ces systèmes réalisent ces tâches souvent très complexes sans aucune analyse linguistique et sans aucune représentation interne des objets fondamentaux de la linguistique comme les phonèmes. Si l'intelligence artificielle est un défi qui conduira très probablement à un renouvellement en profondeur des questionnements en sciences du langage, c'est aussi dans l'immédiat une opportunité pour ces dernières de disposer de nouveaux instruments qui permettent d'aborder des questions jusqu'ici inaccessibles.

Signalons également la progression très nette des dossiers des candidats qui se présentent aux concours (et des lauréats de ces concours) notamment au niveau CR dont la production scientifique et les publications sont souvent d'un niveau exceptionnel. Ce qui est remarquable, c'est que cette progression concerne globalement toutes les spécialités des sciences du langage, ce qui permet de maintenir une diversité thématique importante dans les recrutements.

La section 34 se distingue au sein du CNRS par une parité femme-homme quasi parfaite dans les recrutements et les promotions. Elle se distingue aussi par une internationalisation très grande des candidatures aux concours, avec plus de 65% de candidats étrangers et par suite des recrutements, témoignant ainsi du rayonnement et de la très forte attractivité des laboratoires de sciences du langage de France.

On constate enfin une bonne adéquation entre les principes qui guident les travaux de la section et les priorités scientifiques du CNRS et en particulier de l'InSHS exprimées notamment dans les coloriages des postes ouverts au concours. Un autre point important est que la section 34 recrute et promeut très régulièrement des chercheurs qui sont affectés dans des unités d'autres instituts (INSB, INS2I essentiellement), et cela avant même que certains de ces recrutements ne soient institutionnalisés par des fléchages.

I. Phonétique, phonologie, morphologie, lexicologie et lexicographie

A. Phonétique

La phonétique vise à décrire et à analyser les mécanismes de production et de perception de la parole, ainsi que le produit, acoustique ou perceptif, de ces mécanismes. Elle recouvre principalement aussi bien la description que la modélisation de la production et la perception de la parole du point de vue acoustique et articulatoire (*e.g.*, relations entre perception et production, calcul de l'articulation à partir du signal acoustique). On observe une tendance forte à travailler à l'interface entre phonétique et phonologie de laboratoire et psycholinguistique notamment sur l'acquisition et le bilinguisme. D'autres axes de recherche concernent la description des systèmes sonores des langues, en lien avec la phonologie et la typologie, l'étude diachronique des langues, les variétés régionales et les dialectes romans, champ qui se révèle de plus en plus productif. La phonétique clinique, et notamment les travaux sur les pathologies de la parole, constitue aujourd'hui un autre secteur particulièrement prometteur.

La plupart des recherches en phonétique sont de type expérimental (en production : analyses acoustiques et analyse des gestes des articulateurs ; en perception : tests comportementaux, électrophysiologie, imagerie cérébrale). Le recueil et l'analyse de corpus, allant du contrôlé au spontané, sont largement représentés, avec, pour l'acquisition de la parole, des corpus de parole enfantine ou de parole adressée aux enfants. La modélisation acoustique et articulatoire est également présente dans les études de production bien que les recherches sur les modèles articulatoires devraient être développées davantage. Quelques chercheurs sont spécialisés dans des lan-

gues particulières (*e.g.*, langues afro-asiatiques, langues de l'Asie du sud-est), mais la majorité est généraliste ou adopte une approche comparée.

Parmi les domaines interdisciplinaires auxquels la phonétique apporte une contribution, la sociophonétique et la neuro-phonétique apparaissent comme particulièrement productives. Le premier domaine croise les approches théoriques et les méthodes propres à la phonétique expérimentale avec celles des études variationnistes venant notamment de la sociolinguistique mais aussi de la psycholinguistique (§ III.D) ; dans ce cadre, les nouvelles études sur la voix et le genre prennent de l'importance. Le deuxième domaine, à l'interface entre phonétique, neurologie et sciences cognitives, s'intéresse à l'acquisition et aux pathologies de la parole avec une attention grandissante pour la parole multimodale.

Notons enfin que l'apport des études phonétiques aux études sur la prosodie des langues, y compris dans le cadre du contact linguistique tend à se renforcer.

Unités de recherche : GIPSA-lab (UMR 5216), IPS LiLPa (EA1339), LIMSI (UPR3251), LLING (UMR6310), LPL (UMR7309), LPP (UMR7018), LORIA (UMR7503), PRAXILING (UMR5267).

B. Phonologie

La phonologie se consacre à l'identification et à l'étude des unités minimales pertinentes du langage, ainsi que des principes qui régissent leurs distributions et leurs fonctions. Si phonétiquement on observe une forte variation des réalisations sonores (acoustiques, articulatoires, gestuelles), la phonologie examine les représentations permettant de ramener cette diversité à une identité sous-jacente, à un nombre restreint de catégories (phonèmes, syllabes, gabarits, configurations manuelles en langue des signes) et de principes. Elle s'attache à définir le contenu intrinsèque de ces catégories (traits binaires / unaires, consti-

tuants syllabiques, tons), les processus qui les affectent (harmonie, allongement, assimilation, dissimilation, métathèse, liaison, activité gabaritique) et qui ne peuvent s'expliquer sur la seule base de la substance. Par sa dimension symbolique, la phonologie entretient naturellement des liens avec la morphologie et la syntaxe, disciplines avec lesquelles elle partage une partie de ses outils d'analyse et de formalisation.

La majeure partie des chercheurs en phonologie en France s'inscrivent dans des modèles héritiers du cadre formel génératif : la phonologie du gouvernement et la théorie de l'optimalité. Si l'on observe une proximité naturelle avec la phonétique, et notamment avec la phonologie de laboratoire (voir §1.A), l'émergence actuelle des approches phonologiques des langues signées ne doit pas être négligée. Notons également l'importance croissante des travaux basés sur corpus et le développement des approches quantitatives et/ou mixtes qui remettent en question la dichotomie phonétique/phonologie, voire qui la dépassent.

Les recherches à l'interface de la phonologie et de la phonétique et/ou de la psycholinguistique visent à mieux comprendre et définir le lien entre l'aspect cognitif et abstrait de la parole humaine et son aspect physique et traitent principalement de questions liées à la nature des représentations phonologiques chez l'adulte, l'enfant ou le nourrisson. La démarche expérimentale en phonologie est fortement visible dans les travaux employant les méthodes de la psychologie expérimentale. Elle est également présente dans les recherches fondées sur des approches computationnelles qui visent à proposer des modélisations plausibles du point de vue cognitif dans le cadre des études sur l'acquisition et l'apprentissage de la phonologie.

L'éventail de langues traitées dans le cadre de la phonologie, outre le français et les langues de France, est large et s'appuie sur des données issues d'un travail de terrain permettant d'asseoir les analyses sur une base empirique fiable. Cette richesse contribue efficacement à une meilleure description et compréhension de la diversité typologique des

langues humaines appartenant à des familles génétiquement diverses et typologiquement non reliées (afro-asiatiques, germaniques, romanes, sino-tibétaines, bantoues, basque).

Unités de recherche : BCL (UMR 7320), CLLE (UMR5263), CRLAO (UMR8563), DYLLIS (EA7474), DDL (UMR5596), GIPSA-lab (UMR 5216), IKER (UMR5378), LACITO (UMR7107), LLACAN (UMR8135), LLF (UMR7110), LLING (UMR6310), LLL (UMR7270), LPL (UMR7309), LPP (UMR7018), LSCP (UMR8554), SFL (UMR7023), STL (UMR8163).

C. Morphologie

La morphologie vise à étudier les corrélations régulières qu'entretiennent les lexèmes avec leurs mots-formes (on parle alors de morphologie flexionnelle) ou les lexèmes entre eux (il s'agit alors de morphologie dérivationnelle ou constructionnelle). Selon que l'accent est mis sur la forme, le sens, ou sur les conditions d'utilisation, d'émergence ou de mise en mémoire des lexèmes et de leurs mots-formes, les recherches s'inscriront également dans le champ de la phonologie, de la sémantique, de la syntaxe, de la pragmatique ou de la psycholinguistique. La morphologie se prête bien à la modélisation cognitive et informatique. Elle donne lieu à des travaux relevant du traitement automatique des langues et de la création de bases de données et de ressources.

Toutes ces orientations se retrouvent dans l'éventail des recherches actuellement menées en France, dans des cadres théoriques variés, qui vont de la morphologie paradigmatique, en passant par la morphologie lexématique jusqu'à la morphologie dite distribuée. Les méthodologies sur lesquelles ces travaux se fondent tendent à s'appuyer sur des corpus de grande taille et relèvent pour certains de la linguistique expérimentale.

Une nouvelle orientation prometteuse pour l'étude de l'organisation morphologique du lexique est fondée sur l'exploitation de ressources lexicales participatives comme les

dictionnaires collaboratifs. Ces travaux se situent à l'articulation entre morphologie, linguistique de corpus et traitement automatique des langues.

Les recherches en morphologie essentiellement conduites sur le français et sur les langues romanes portent aussi sur des langues non indo-européennes (notamment afro-asiatiques, amérindiennes, sino-tibétaines, basque).

Unités de recherche : ATILF (UMR7118), CLLE (UMR5263), LLF (UMR7110), LLING (UMR6310), LLL (UMR7270), MoDyCo (UMR7114), SFL (UMR7023), STL (UMR7023).

D. Lexicologie et lexicographie

La lexicologie étudie les unités lexicales, les mots et les expressions figées mais également les relations qu'elles entretiennent entre elles. Elle donne lieu à des travaux diachroniques (étude du lexique dans une perspective historique et philologique ; réalisation de dictionnaires étymologiques) et synchroniques (constitution de dictionnaires ; analyse des interactions entre lexique et syntaxe, entre lexique et sémantique ; évolution du lexique dans sa mise en discours ; place du lexique dans la cognition).

Les recherches lexicales, terminologiques et phraséologiques se servent souvent des méthodes de la linguistique de corpus pour l'analyse des collocations, de la néologie ou encore des langues de spécialité. Toujours en lien avec la linguistique de corpus, la lexicométrie s'intéresse à la fréquence et aux cooccurrences des unités lexicales dans des corpus textuels, ainsi qu'à leur sens et leur usage.

Les travaux de lexicologie et lexicographie et notamment la constitution de dictionnaires et de grands corpus, couvrent un grand nombre de langues avec en premier lieu le français et les langues romanes et leurs variétés dialectales, l'allemand, les langues peu dotées d'Afrique sub-saharienne et d'Asie du sud-est et les langues en danger.

Un développement récent en lexicographie est la création participative de dictionnaires de qualité. Cette nouvelle lexicographie collaborative et les ressources lexicales qui en dérivent restent peu explorées dans les travaux plus traditionnels et sont principalement exploitées par d'autres secteurs de la linguistique comme la morphologie (§ I.C), la linguistique de corpus (§ V.B), la didactique des langues et pour la remédiation auprès de personnes atteintes de pathologies de la parole et de la lecture.

Unités de recherche : ATILF (UMR7118), BCL (UMR7320), CRLAO (UMR8563), DDL (UMR5596), IREMAM (UMR7310), LACITO (UMR7107), LATTICE (UMR8094), LIDILEM (EA609), LIG (UMR5217), LLACAN (UMR 8135), STL (UMR8163).

II. Syntaxe, sémantique, pragmatique, discours, texte et dialogue, philosophie du langage

A. Syntaxe

La syntaxe étudie la façon dont des unités de signification (morphèmes, mots) se combinent entre elles pour engendrer des unités de signification plus grandes (syntagmes, propositions, phrases). Elle cherche à déterminer les combinaisons possibles et impossibles d'unités et à découvrir les principes qui président à leur combinaison, et ce faisant à éclairer les mécanismes de leur interprétation.

Les recherches en syntaxe sont diversifiées, tant du point de vue des paradigmes scientifiques et méthodologiques représentés, qu'au niveau des aires culturelles couvertes. Les cadres théoriques adoptés incluent la grammaire générative minimaliste, HPSG, les gram-

maires de contraintes, les approches fonctionnalistes, etc. Les recherches portent notamment sur l'interface avec les autres niveaux d'analyse, notamment la sémantique, la morphologie, la phonologie et la prosodie. Des recherches sont conduites à la fois dans un but descriptif (description explicite de la grammaire de différentes langues) et dans un but théorique (mise au jour de principes et contraintes universels). Beaucoup de recherches combinent la syntaxe avec le traitement automatique des langues (TAL), la psycholinguistique, la typologie, la linguistique de terrain ou la sociolinguistique. Elles comportent une forte dimension expérimentale qui met à l'épreuve les hypothèses théoriques en collectant des données de traitement, de compréhension ou de production, études de corpus et en recourant à des méthodes d'analyse quantitative. Nous assistons par ailleurs à un renouvellement des questionnements avec des travaux sur la syntaxe et la sémantique des langues signées, et également en neuro-syntaxe (études des corrélats neuroaux des structures syntaxiques hiérarchiques).

Les recherches en syntaxe portent sur un grand éventail de langues : langues romanes, germaniques ou slaves, mais également des langues typologiquement plus éloignées, notamment le basque, les langues d'Asie orientale, langues celtiques, ainsi que les créoles, les langues mandées, les langues tchadiques, ou les langues des signes.

Unités de recherche : BCL (UMR7320), CRLAO (UMR8563), IKER (UMR5478), IJN (UMR8129), LLACAN (UMR8135), LLF (UMR 7110), LLING (UMR 6310), Mondes iranien et indien (FRE2018), SeDyL (UMR8202), SFL (UMR7023).

B. Sémantique

La sémantique a pour sujet le sens ou contenu des mots et des constructions linguistiques (syntagmes, phrases, discours). Elle s'intéresse notamment à la manière dont le sens d'une expression complexe dépend du sens de ses élé-

ments plus simples (compositionnalité). Son champ inclut l'étude (*i*) des catégories lexicales à pertinence grammaticale (sémantique des classes de noms, des classes de verbes et types de situations, des expressions gradables, vagues ou scalaires, etc.) et de l'ontologie qu'elles supposent, (*ii*) des items lexicaux appartenant aux catégories fonctionnelles qui constituent « l'appareil quantificationnel du langage » (déterminants, nombre grammatical, temps, aspect, modalité, etc.), (*iii*) des questions d'interface syntaxe-sémantique comme l'interprétation des pluriels, la portée relative des quantificateurs, l'interprétation de l'ellipse et des anaphores et la relation entre la sémantique lexicale et la structure argumentale syntaxique, et (*iv*) de la part qui revient à l'intégration de diverses dimensions de sens dans le calcul du contenu d'une phrase ou d'un texte comme la présupposition, les inférences pragmatiques, ou la dimension émotive ou évaluative. Depuis plusieurs décennies, une grande partie des sémanticiens dans le monde modélise le sens en utilisant la théorie des modèles issue de la logique et de la sémantique des langages formels, dans laquelle la notion centrale est celle de *conditions de vérité* (en première approximation, le sens d'un énoncé est assimilé à l'ensemble des situations possibles dans lesquelles l'énoncé est vrai). Un développement important a consisté à passer des modèles vériconditionnels à des approches dynamiques permettant une intégration de la sémantique de la phrase et du discours. L'approche vériconditionnelle a également été enrichie pour rendre compte de l'interprétation des énoncés non-déclaratifs (interrogatifs, impératifs).

On constate notamment dans le paradigme de la sémantique formelle des ouvertures importantes conduisant à l'intégration (*i*) d'aspects discursifs et dialogiques, en général dans le cadre d'approches dynamiques du sens, avec un intérêt accru pour la modélisation du sens des phrases non-déclaratives en contexte, des actes de langage autres que l'assertion, et de marqueurs discursifs et dialogiques ; (*ii*) de la dimension sociale de la construction de la signification, avec des travaux qui utilisent à la fois des méthodes formelles et celles de la sociolinguistique ; (*iii*) d'approches empiriques nouvelles, et ceci dans les deux domaines que

constituent le travail sur les grands corpus et les expériences psycho-, voire neurolinguistiques ; (iv) de données provenant de domaines nouveaux, en particulier les langues des signes, qui fournissent un terrain particulièrement propice à l'exploration des contraintes sémantiques universelles sur des phénomènes de deixis, d'attitudes propositionnelles, d'ellipse, d'anaphore, des gestes co-verbaux ou pro-verbaux et, au-delà du langage, de la musique.

La sémantique connaît actuellement un renouvellement important, la conduisant à adopter certaines des méthodes et des concepts de l'informatique et de la psychologie cognitive. On note aussi le rôle nouveau que prennent les approches distributionnelles fondées sur les méthodes d'apprentissage automatiques, qui s'appuient en particulier sur l'apprentissage profond au moyen de réseaux de neurones. Notons également l'émergence de théories probabilistes de la sémantique et de la pragmatique, modélisant l'interprétation comme un processus de raisonnement sous incertitude via des méthodes fréquemment utilisées dans les sciences cognitives et l'intelligence artificielle pour traiter la perception, le raisonnement et la construction des concepts.

Bien que le français, les langues romanes, l'anglais, l'allemand, les langues slaves et les langues signées fournissent le gros des données, les recherches en sémantiques portent aussi sur des langues typologiquement variées comme le basque, les langues créoles ou les langues d'Asie orientale.

Unités de recherche : CRLAO (UMR8563), IJN(UMR8129), IKER (UMR5478), IRIT (UMR 5505), L2C2 (UMR5304), LABRI (UMR5800), LACITO (UMR7107), LATTICE (UMR8094), LLACAN (UMR8135), LLF (UMR7110), LLING (UMR6310), LORIA (UMR7503), LPL (UMR 7309), LSCP (UMR8554), SFL (UMR7023).

C. Pragmatique

L'interprétation d'une phrase ou d'un discours, dans un contexte donné, dépend à la

fois de sa signification linguistique littérale (déterminée par le sens des mots qui y apparaissent et par la structure syntaxique), de certains paramètres du contexte, et des *inférences* que les interlocuteurs dérivent au sujet de l'état épistémique du locuteur et de ses intentions communicatives.

La pragmatique s'intéresse d'une part à tous les aspects *contextuels* de la signification linguistique. Nombre d'expressions et constructions reçoivent leur contenu du contexte. Les exemples les plus évidents sont les pronoms, les démonstratifs, ou prédicats gradables, mais l'importance du contexte dans l'assignation d'un contenu aux expressions est en réalité extrêmement générale. De plus, les énoncés ont non seulement des *conditions de vérité*, mais aussi des *conditions d'usage* qui font référence au contexte, conditions qui font souvent partie du sens proprement linguistique des expressions – présuppositions lexicales, notamment. Au-delà, la pragmatique s'intéresse à tous les aspects conventionnels de la signification qui ne se réduisent pas aux conditions de vérité, parfois rangés dans la rubrique des « implicatures conventionnelles ». D'autre part, la pragmatique s'intéresse à la dimension *inférentielle* de l'interprétation. Elle cherche à comprendre la manière dont les interlocuteurs enrichissent le sens proprement linguistique pour interpréter les énoncés dans leur contexte en raisonnant sur les intentions des interlocuteurs – phénomènes d'implicatures conversationnelles.

Les recherches en pragmatique se développent selon deux directions principales, qui sont souvent combinées : une direction formelle, et une direction expérimentale. La première direction, celle de la pragmatique formelle, est généralement menée de concert avec les travaux en sémantique formelle et en sémantique du discours, et vise à produire des modèles explicites des phénomènes de dépendances contextuelles (pronoms, présuppositions, implicatures conventionnelles), au moyen de formalismes inspirés par la logique, et plus récemment, au moyen de modèles probabilistes bayésiens ou relevant de la théorie des jeux. La seconde direction relève de la psy-

chologie cognitive en particulier de la psychologie du raisonnement et de la cognition sociale, et comprend aussi une dimension développementale (étude du développement des capacités pragmatiques chez les enfants). Une partie des travaux conduits en pragmatique expérimentale vise aussi à tester les prédictions des modèles formels ou à dégager les mécanismes cognitifs sous-jacents aux généralisations dégagées par les linguistes. Les méthodes employées incluent notamment l'électro-encéphalographie et les méthodes comportementales.

Unités de recherche : ATILF (UMR7118), CLLE (UMR5263), CRLAO (UMR8563), IJN (UMR8129), IRIT (UMR5505), L2C2 (UMR 5304), LLF (UMR7110), LPL (UMR7309), LSCP (UMR8554), SFL (UMR7023).

D. Discours, texte et dialogue

Les recherches sur le discours, les textes et le dialogue concernent les approches linguistiques portant sur la structure et le contenu de productions plus longues qu'une phrase, et incluant souvent la multidimensionnalité et la multimodalité. Une hypothèse commune aux travaux dans ce domaine est l'idée que ces productions ne sont pas seulement des suites de phrases ou d'énoncés, et que leur contenu n'est pas seulement une conjonction ou une intersection des valeurs sémantiques de ces phrases.

Au sein de l'analyse du discours, la linguistique interactionnelle s'intéresse plus spécifiquement à l'analyse et à la modélisation de processus cognitifs mis en œuvre dans les interactions communicatives finalisées. L'interaction y est conçue comme la forme fondamentale de sociabilité, de contexte de raisonnement pratique ainsi que le lieu d'émergence et de stabilisation de la grammaire. Elle peut dès lors contribuer à l'élaboration d'une démarche théorique et méthodologique apte à

rendre compte de l'émergence de la cognition et de la connaissance, dans et par le dialogue. Les interactions analysées sont situées dans des contextes sociaux spécifiques (éducatifs, commerciaux, médicaux, etc.) ou médiées par ordinateur. L'un des enjeux forts de ces recherches est de documenter la dimension multimodale des interactions à distance. Avec l'explosion de la société de l'information, l'analyse du discours prend, théoriquement et empiriquement, une nouvelle dimension autour de l'étude des médias sociaux et des usages médiés de la langue, avec de nombreuses ramifications applicatives.

L'analyse de discours produit des analyses formelles de l'interaction dialogique capables de capter de manière précise les aperçus empiriques de la linguistique interactionnelle et de la psychologie cognitive, notamment en collaboration avec le TAL pour créer des systèmes de dialogue parlés comme les assistants vocaux. Les efforts se sont aussi concentrés sur l'interaction entre approches computationnelles (méthodes statistiques d'apprentissage automatique ; méthodes hybrides utilisant à la fois des méthodes symboliques et statistiques) et études formelles de la structure et du contenu du discours (SDRT, RST, DLTAG).

Le développement récent des initiatives de normalisation et d'échange de corpus textuels, oraux et vidéo, des systèmes pour leur annotation linguistique et sémiotique et enfin leur instrumentation informatique, permet à l'analyse du discours de se développer autant dans sa dimension descriptive, comparative et théorique, en lien avec des sous-disciplines des sciences du langage telles que la linguistique cognitive ou la sociolinguistique, et des sous-disciplines en dehors des sciences du langage, en lien avec les sciences cognitives, la psychologie, la théorie littéraire et les sciences sociales pour la modélisation des paramètres sociaux-cognitifs impliqués dans l'acte communicationnel.

Unités de recherche : GREYC (UMR6072), ICAR (UMR5191), IJN (UMR8129), IRIT (UMR

5505), LATTICE (UMR8094), LLF (UMR7110), LORIA (UMR7503), LPL (UMR7309), PRAXILING (UMR5267), SeDyL (UMR8202).

E. Philosophie du langage

La philosophie du langage se rattache à la philosophie analytique, à la sémantique et à la logique, tout en ayant une forte préoccupation pour des thématiques pragmatiques et sémantiques, principalement liées à la communication implicite.

Parmi les questions linguistiques qui font l'objet de recherches actives en philosophie du langage, on compte l'indexicalité, les attitudes propositionnelles (concepts correspondant aux verbes *croire*, *penser*, *savoir*, *vouloir*, etc.), l'intensionnalité et l'hyperintensionnalité, le vague, l'interprétation des énoncés conditionnels, la sémantique des termes dépréciatifs comme les insultes et des termes évaluatifs.

L'intérêt pour la communication implicite a contribué de façon cruciale au débat sur le contextualisme qui concerne la détermination de la frontière entre sémantique et pragmatique dans l'interprétation des énoncés et également sur les dimensions expressives (non propositionnelles) de la signification linguistique. Par ailleurs, la philosophie du langage a développé des travaux sur les rapports entre langage et pensée, sur la référence et les fichiers mentaux, sur le rôle de la perspective dans la production des énoncés, ou sur de nouvelles approches du vague articulant modèles psychologiques, logiques et probabilistes. Elle s'intéresse aussi aux liens entre langage et ontologie, et à la clarification des concepts, en s'appuyant sur les résultats de la sémantique linguistique.

Unités de recherche : Archives Poincaré (UMR7117), CLLE (UMR5263), IJN (UMR 8129), IHPST (UMR8590), L2C2 (UMR5304), MoDyCo (UMR7114), SFL (UMR7023), STL (UMR8163), SND (UMR8011).

III. Évolution du langage, typologie et diversité des langues, linguistique historique et comparative, sociolinguistique, contact de langues et dialectologie

A. Évolution du langage

L'évolution du langage est une question par nature profondément interdisciplinaire, à la frontière de la biologie, de la paléanthropologie, des sciences du langage et de la psychologie comparée. On peut distinguer deux grands types d'approches parmi les théories actuelles sur l'évolution du langage. Il y a, d'une part, des approches fondées sur la simulation informatique de processus comme la création de conventions lexicales, l'étude des conditions nécessaires à l'évolution de la coopération (souvent jugée comme indispensable à l'apparition du langage) ou les limites de la communication holistique qui rendent indispensable la double articulation pour un système de communication productif, comme l'est le langage. Ces approches sont souvent basées sur la théorie des jeux. Il y a, d'autre part, des approches de nature plus théorique et interdisciplinaire, qui cherchent à identifier les spécificités structurelles du langage utilisé dans la communication humaine et ce qui lui est propre par rapport aux systèmes de communication animale (psychologie comparée). Ces spécificités liées aux capacités cognitives et culturelles humaines permettent de dégager des scénarios pour l'évolution du langage. Ce courant se base sur la psychologie cognitive, les neurosciences, la psychologie comparée, la paléanthropologie, l'anthropologie, la simulation informatique et les sciences du langage.

Unités de recherche : DDL (UMR5596), ISCMJ (UMR5229), L2C2 (UMR5304), LSCP (UMR8554), GIPSA-lab (UMR5216).

B. Typologie et diversité des langues

La typologie linguistique étudie la diversité de traits linguistiques attestés à travers les langues du monde ainsi que leur variation et leur évolution dans le temps. Elle porte sur tous les niveaux : phonétique, phonologique, prosodique, morphologique, syntaxique, sémantique, discours, contact de langues, etc. La typologie s'intéresse aussi à la description de langues peu étudiées, dans des perspectives variées : fonctionnaliste, linguistique théorique, etc.

La description typologique des langues est aussi liée à un courant en pleine expansion, celui de la documentation linguistique qui met l'accent sur le recueil et l'archivage pérenne de données linguistiques riches, permettant de préserver un témoignage des langues menacées et d'assurer leur disponibilité pour d'éventuelles descriptions futures. Une autre tendance récente est l'adoption d'approches typologiquement informées par la philologie et la linguistique historique.

Si les bases de données qui recensent les propriétés d'un nombre de langues du monde relativement grand, comme *World Atlas of Language Structures*, ont marqué la typologie dans les années 2000, leurs limites ont mené au développement de nouvelles approches, fondées sur des bases de données plus réduites mais mieux maîtrisées. Sur le plan méthodologique, la typologie des langues est confrontée aux problèmes inhérents du recensement de phénomènes linguistiques à travers des grammaires rédigées par divers auteurs et à différents moments de l'histoire de la discipline. En réponse à ces difficultés, les nouvelles grammaires tendent à être associées à des corpus de données orales et écrites. De nombreux travaux sont fondés sur des questionnaires typologiques associés à des stimuli conçus pour l'étude de phénomènes spécifiques tout en étant culturellement adaptés aux différentes populations à travers le monde (e.g. stimuli vidéo). On note d'autre part un renouvelle-

ment dans le domaine de la typologie quantitative qui s'appuie de plus en plus sur des modèles statistiques sophistiqués et une intensification des collaborations avec l'anthropologie moléculaire, les neurosciences ou la géographie.

Unités de recherche : CRLAO (UMR8563), DDL (UMR5596), IJN (UMR8129), IKER (UMR5378), LACITO (UMR7107), LLACAN (UMR8135), LLF (UMR7110), LLING (UMR 6310), LLL (UMR7270), Mondes iranien et indien (FRE2018), SFL (UMR7023), SeDyL (UMR8202).

C. Linguistique historique et comparative

L'étude de l'évolution des langues à travers le temps et des parentés entre les langues est l'une des branches les plus anciennes de la linguistique. Les théories sur le changement linguistique, les méthodes de reconstruction et de classification des langues, et les hypothèses sur les différentes familles de langues, si elles ont progressé au fil des découvertes et des croisements avec la linguistique générale, la géographie linguistique et la sociolinguistique, sont restées stables depuis le XIX^e siècle, et font ainsi de la linguistique historique et comparative un domaine remarquablement cumulatif et unifié au sein de la linguistique. Les recherches en comparatisme se situent à l'interface avec la linguistique de la diversité et la typologie des langues et sont souvent menées par des linguistes de terrain sur des familles de langues diverses.

La linguistique historique et comparative connaît ces dernières années des avancées nouvelles grâce à une grande ouverture à l'interdisciplinarité. Les travaux sur les classifications des langues ont progressé et ont connu un renouveau grâce à l'apport des méthodes phylogénétiques computationnelles utilisées en biologie. En outre, les collaborations entre linguistes, archéologues et généticiens ont permis des avancées importantes sur l'histoire

des populations humaines, de leurs mouvements, et de leurs interactions. La linguistique historique et comparative bénéficie également du développement des humanités numériques, de la numérisation de corpus écrits de nombreuses langues anciennes et de la mise à disposition de bases de données sur les langues qui facilitent le test et la répliquabilité des hypothèses, et permettent d'appliquer des méthodes statistiques et computationnelles. La création de bases de données comparatives et étymologiques en ligne, augmentées et améliorées de façon continue permettent de dépasser les limites imposées par les dictionnaires traditionnels. Les études sur la grammaticalisation et les bases cognitives des changements grammaticaux et sémantiques continuent à jouer un rôle important qui dépasse les frontières de la linguistique historique. D'autres avancées ont lieu grâce aux interactions mutuellement bénéfiques avec les autres domaines de la linguistique comme entre autres la sociolinguistique, les études sur les créoles, la linguistique aréale et de contact, la typologie, ou encore la linguistique formelle.

Dans les prochaines années, on peut prévoir que la linguistique historique et comparative va continuer son ouverture vers l'utilisation de modèles statistiques et computationnels, ainsi que l'informatisation de ses méthodes de comparaison et de reconstruction, tout en continuant à jouer un rôle majeur dans les travaux interdisciplinaires sur l'histoire des populations. En revanche, le rapide déclin de l'étude des langues classiques dans l'enseignement français fait peser une menace sur les recherches sur les langues indo-européennes, alors qu'il s'agit de la famille de langues dont l'étude a donné naissance à la linguistique historique et comparative, et que la France a une longue tradition d'excellence dans ce domaine par ailleurs en fort développement à l'international.

Unités de recherche : ATILF (UMR7118), CRLAO (UMR8563), DDL (UMR5596), LACITO (UMR7107), LATTICE (UMR8094), LLACAN (UMR8135), LLF (UMR7110), Mondes iranien et indien (FRE2018).

D. Sociolinguistique, contact de langues et dialectologie

La sociolinguistique est aujourd'hui une discipline au caractère multipolaire qui regroupe des recherches développées selon une grande diversité d'approches théoriques et méthodologiques. L'intérêt commun à tous les chercheurs de ce domaine porte sur les dimensions sociales des pratiques et des usages linguistiques à tous les niveaux des systèmes (prosodique, phonologique, syntaxique, discursif, etc.), qu'il s'agisse de langues orales ou signées. Par exemple, certaines recherches plus généralement consacrées à l'étude des systèmes sonores, approfondissent des aspects spécifiques pertinents pour la sociolinguistique tels que la sociophonétique et la sociophonologie ou l'étude de la voix genrée.

Au sujet des langues des signes, les recherches ont montré depuis au moins deux décennies, que les dynamiques de la variation sociolinguistique, du contact et du plurilinguisme sont tout à fait similaires dans les communautés des sourds et des entendants. Pour cette raison, certains laboratoires spécialisés dans les langues des signes intègrent ainsi la dimension sociolinguistique dans le cadre de projets d'équipe ou de recherches individuelles.

Dans le domaine de la sociolinguistique, les données observables étant recueillies de préférence sur le terrain, le travail d'enquête est central, sans pour autant négliger les productions écrites, dans le cadre d'une sociolinguistique des textes allant, par exemple, des biographies migratoires aux écritures « exposées » dans les contextes urbains, ou encore aux productions des internautes. Les documents écrits sont aussi la source fondamentale de la *sociolinguistique historique* — approche encore en évolution en France — qui prend en compte la composante sociale dans l'étude diachronique des usages attestés dans des textes proches de l'oralité (par exemple, textes anciens écrits par des personnes peu lettrées,

documents comptables, autobiographies, témoignages de procès).

La constitution de corpus surtout oraux, d'ampleur différente, constitue un enjeu important pour les sociolinguistes et notamment pour ceux qui se consacrent au milieu urbain, observatoire privilégié de la diversité et du contact aux niveaux socioculturel et linguistique. Dans cette direction, il faut mentionner, la mise en place de grands corpus variationnistes de sociolinguistique urbaine : ESLO-Enquêtes Sociolinguistiques à Orléans, corpus prototypique hébergé sur Humanum ; *Multicultural Paris French* (MPF), relatif aux « parler jeune » de la région parisienne ; bases de données sonores qui rendent compte de la situation sociolinguistique de Toulouse et de Marseille ; etc. D'autres corpus sont enregistrés dans des situations plus variées, notamment professionnelles.

Dans le cadre de la sociolinguistique variationniste, l'approche quantitative est prise en compte en fonction de la modélisation formelle et computationnelle des théories sociolinguistiques ou en fonction des recherches en *sociolinguistique développementale* en direction aussi d'un croisement avec les sciences cognitives.

La dimension du contact de langues et les enjeux du plurilinguisme ont une position centrale dans les recherches sociolinguistiques : c'est le cas de nombreux chercheurs et laboratoires qui se consacrent aux espaces des « pays des Suds », aux langues régionales, aux langues des signes ou encore au plurilinguisme et à l'interculturalité ainsi qu'au contact en contexte migratoire. L'émergence de variétés de contact et, en particulier, de créoles et de pidgins constitue aussi un sujet central dont la portée dépasse les frontières de ce secteur disciplinaire pour contribuer à la réflexion sur l'origine du langage et la formation des langues.

Enfin, on note en France la consolidation du courant de la *sociolinguistique critique* qui est très dynamique dans le monde anglo-saxon.

En ce qui concerne la dialectologie, les recherches couvrent un éventail important de

thématiques, allant de la comparaison typologique et génétique à grande échelle, dans le cadre des atlas multilingues et de grandes bases de données, des matériaux atlantographiques accumulés à partir de la fin du XIX^e siècle, à la contribution à la typologie des langues d'aires de frontière situées entre les grands groupes dialectaux (Croissant, Drôme provençale, etc.). En parallèle, la production des atlas linguistiques dits « régionaux » se poursuit pour couvrir les zones dont les données recueillies n'ont pas encore été cartographiées (Provence, Brie, Champagne, Corse, Pays basque) ; en même temps, d'autres atlas (publiés ou en cours) consacrés à des aires géographiquement non européennes font l'objet des recherches géolinguistiques (Cap Vert, Antilles, Polynésie française, etc.). La cartographie interprétative des phénomènes dialectaux et l'atlantographie sonore des variétés dialectales se développent aussi, grâce à des collaborations interdisciplinaires de plus en plus fortes entre dialectologues et chercheurs en informatique et en géomatique.

Les recherches en sociolinguistique et contact des langues contribuent aussi activement à l'élaboration de propositions et de solutions dans le cadre de l'éducation plurilingue, de l'interculturalité, de la standardisation linguistique et des politiques linguistiques adoptées dans un territoire par rapport à la gestion institutionnelle ou associative de l'insécurité langagière ou de l'exclusion des minorités sociales. Les recherches en dialectologie apportent des connaissances à l'étude typologique des langues et participent à la réflexion sur la politique institutionnelle au sujet de la préservation du patrimoine linguistique et culturel.

Unités de recherche : ATILF (UMR7118), BCL (UMR7320), CHLESTIA (EA7345), CLLE (UMR5263), DDL (UMR5596), DIPRALANG (EA739), DYLLIS (EA7474), GIPSA-lab (UMR 5216), ICAR (UMR5191), ICARE (EA7389), IKER (UMR5478), IREMAM (UMR7310), LACITO (UMR7107), LIDILEM (EA609), LILPA (EA1339), LIMSI (UPR3251), LISA (UMR6240), LLACAN (UMR8135), LLF (UMR7110), LLL (UMR7270), LPL (UMR7309), LPP (UMR7018),

MoDyCo (UMR7114), PRAXILING (UMR5267), PREFICS (EA7469), SAPRAT (EA4116), SeDyL (UMR8202), SFL (UMR7023).

IV. Psycholinguistique et neurolinguistique, acquisition du langage

A. Psycholinguistique et neurolinguistique

La psycholinguistique et la neurolinguistique visent à décrire et à analyser (*i*) les mécanismes cognitifs qui permettent de produire et comprendre le langage au sens large et (*ii*) les représentations mentales et cérébrales du langage chez des individus présentant ou non une pathologie. Ces recherches recourent aux méthodes comportementales et psychophysiques (*e.g.*, chronométrie mentale, oculométrie, enregistrements articulatoires et acoustiques), aux méthodes électrophysiologiques, aux méthodes d'imagerie cérébrale (IRMf, TMS, NIRS) et à la modélisation computationnelle. Beaucoup de travaux sont réalisés sur corpus parlés, spontanés ou non, ou encore sur corpus écrits.

Les travaux réalisés en psycholinguistique et neurolinguistique portent principalement sur le traitement du langage parlé, tant en perception qu'en production, depuis les traitements auditifs, phonétiques et phonologiques jusqu'à la syntaxe, la sémantique et la pragmatique en passant par la morphologie et l'accès au lexique. Les mécanismes de traitement du langage parlé sont étudiés en interaction avec les caractéristiques du locuteur (*e.g.*, bilingue, multilingue, monolingue). Une place de plus en plus grande est dédiée aux études reposant sur des comparaisons inter-langues. Ces travaux visent notamment à étudier l'impact des

propriétés spécifiques des systèmes linguistiques sur les mécanismes de traitement du langage. Les recherches sur le traitement du langage écrit portent notamment sur l'influence de l'orthographe sur la perception phonétique ou l'accès au lexique, sur les processus de médiation phonologique et sur l'analyse morphologique. Quelques travaux traitent plus particulièrement du lien production-perception tant au niveau du langage parlé que du langage écrit.

Une part importante de ces recherches est dédiée à l'acquisition du langage (§ IV.B) chez le nourrisson et le jeune enfant ayant un développement typique ou atypique mais aussi chez l'adulte apprenant une langue seconde. Les travaux impliquant différentes populations cliniques (dyslexie, dysphasie, individus malentendants avec ou sans implant cochléaire, maladie de Parkinson, démence de type Alzheimer, lésions cérébrales, autisme, schizophrénie) et l'impact des différentes pathologies sur les mécanismes de traitement du langage sont une autre tendance de plus en plus forte. Signalons également des travaux s'intéressant au développement de stratégies compensatoires à l'oral et à l'écrit.

Unités de recherche : BCL (UMR7320), CeRCA (UMR7295), CLLE (UMR5263), DDL (UMR5596), GIPSA-lab (UMR5216), ISCMJ (UMR5229), LLF (UMR7110), LLING (UMR 6310), LPC (UMR7290), LPL (UMR7309), LPNC (UMR5105), LPP (UMR8242), LPP (UMR7018), LSCP (UMR8554), L2C2 (UMR5304), MoDyCo (UMR7114), SCALab (UMR9193), SFL (UMR 7023), STL (UMR8163).

B. Acquisition du langage

Les recherches sur l'acquisition du langage se répartissent en trois grands domaines. (*i*) Elles portent sur les questions typiquement abordées chez l'adulte en pragmatique ou en sémantique formelle, telles que les implicatures scalaires. Ces questions sont également étudiées chez l'enfant, avec comme objectif

de tracer le développement de ces phénomènes. *(ii)* Certains chercheurs étudient le développement de la compréhension et de la production du vocabulaire et de certaines constructions syntaxiques. Ce domaine interagit fortement avec l'étude de populations particulières comme les enfants bilingues ou les enfants souffrant de troubles du développement. Ce domaine comporte également des études de corpus. *(iii)* De nombreux travaux s'intéressent aux toutes premières étapes de l'acquisition du langage, chez le nourrisson de moins d'un an, y compris chez le nouveau-né quelques jours seulement après la naissance. Ces travaux tendent à insister sur les contraintes biologiques du processus d'acquisition. À noter également les interactions de plus en plus nombreuses avec d'autres champs des sciences cognitives et de la linguistique. Outre les interactions déjà anciennes avec les phonologues et les phonéticiens, on note une ouverture en direction de la sémantique formelle, de la modélisation informatique et de la primatologie (comparaisons des capacités d'apprentissage du nourrisson ou du jeune enfant avec d'autres espèces de primates non-humains).

Trois enjeux principaux sont à souligner à moyen terme : *(i)* Les solutions à apporter à la crise de la réplication qui touche toutes les sciences expérimentales sont fortement débattues dans cette discipline. La plupart des laboratoires concernés cherchent à augmenter le nombre de sujets inclus dans leurs études, et/ou à répliquer leurs principaux résultats. Certains laboratoires mettent également en place des protocoles de pré-enregistrement de leurs études. Ces efforts sont encourageants. *(ii)* Les interactions du domaine de l'acquisition du langage avec d'autres domaines des sciences cognitives s'intéressant aux représentations sémantiques et conceptuelles se développent. Ces disciplines ont fortement évolué ces dernières années, notamment grâce à l'apport des neurosciences. *(iii)* Les résultats de recherche fondamentale sont traduits en outils diagnostiques ou interventionnels à destination des enfants souffrant de retards ou troubles linguistiques.

Unités de recherche : CeRCA (UMR7295), DDL (UMR5596), GIPSA-lab (UMR5216), ISCMJ (UMR5229), LLING (UMR6310), LPC (UMR7290), LPL (UMR7309), LPNC (UMR5105), LPP (UMR8242), LSCP (UMR8554), L2C2 (UMR5304), MoDyCo (UMR7114), PRA-XILING (UMR5267), SFL (UMR7023), STL (UMR8163).

V. Traitement automatique du langage naturel et linguistique informatique, linguistique de corpus, histoire de la linguistique

A. Traitement automatique du langage naturel et linguistique informatique

Le traitement automatique des langues (TAL) et la linguistique informatique (LI) traitent de la modélisation informatique des langues humaines, aussi dites « langues naturelles ». Bien que la frontière entre LI et TAL ne soit pas étanche et que ces deux sous-disciplines partagent souvent les mêmes outils et les mêmes supports et lieux de dissémination, elles poursuivent des objectifs différents. Ainsi, la LI se focalise avant tout sur la mise en œuvre de méthodes mathématiques et informatiques pour répondre à des questions de linguistique, notamment en ce qui concerne la nature des connaissances et des représentations linguistiques, leur acquisition et leur déploiement dans la compréhension et la production du langage. Le TAL, en revanche, est davantage tourné vers les applications (extraction d'informations, traduction automatique, systèmes de question-réponse, agents conversationnels, etc.), en cherchant à résoudre des

problèmes d'ingénierie qui requièrent l'analyse ou la génération de texte en langue naturelle.

Traditionnellement, une grande part des recherches à l'intérieur de ces domaines est structurée autour des différents niveaux d'analyse linguistique : alignement texte/parole ; étiquetage morphosyntaxique ; l'analyse syntaxique (en constituants ou en dépendances) ; résolution des anaphores et des coréférences ; inférence entre phrases ; étiquetage des tours discursifs ; etc. En TAL, cette perspective est néanmoins remise en cause par le développement d'approches dites *end-to-end* très performantes pour des applications telles que la traduction automatique qui font l'économie de toute analyse linguistique intermédiaire.

Les dernières décennies ont vu des changements de paradigmes importants dans le TAL, avec des implications sur la recherche en LI. Le TAL, comme d'autres domaines relevant de l'Intelligence Artificielle (IA), connaît en effet un effacement progressif des approches symboliques (e.g., approches logiques, systèmes à base de règles) au profit des approches basées sur des algorithmes d'apprentissage automatique, elles-mêmes rendues possibles par la disponibilité croissante de jeux de données permettant l'évaluation quantitative des systèmes. Au sein de ce courant, les approches par réseaux de neurones profonds, sous la forme de réseaux convolutifs (CNN) ou récurrents (RNN), occupent à présent une place dominante, ayant permis des avancées significatives sur de nombreuses tâches de TAL classiques. Une partie de leurs bonnes performances vient de la construction automatique, sur de larges quantités de textes, de représentations vectorielles de faible dimension, notamment des *word embeddings*, qui permettent de s'affranchir de la recherche « manuelle » de bons descripteurs. S'appuyant sur ce type de représentations distribuées, de nouvelles architectures ont aussi vu le jour et trouvent des applications en TAL, tels que les modèles à mémoire, basés sur des mécanismes d'attention, en vue de mieux modéliser les dépendances à longue distance, les approches neuronales par renforcement, les modèles

profonds génératifs tels les auto-encodeurs variationnels ou les réseaux antagonistes génératifs (GAN).

Malgré les promesses ouvertes par les réseaux de neurones profonds, ceux-ci souffrent de certaines limitations importantes, en particulier la nécessité de disposer de volumes de données très importants, leur tendance à sur-apprendre, et la difficulté voire l'impossibilité d'interpréter leurs prédictions (*i.e.*, leur côté *boîte noire*). Le développement d'approches neuronales moins voraces en données, applicables à des langues peu dotées, et se prêtant à une plus grande explicabilité figurent parmi des défis majeurs pour les prochaines années.

De manière plus générale, ces transformations vont de pair avec un rapprochement important entre les communautés TAL et apprentissage automatique, qui n'est pas sans poser de sérieuses questions sur ce qui fait la spécificité et l'autonomie réelle du TAL comme champ de recherche. Ces mutations se caractérisent aussi par une prise de distance, voire une remise en question des niveaux de représentations postulés par les linguistes théoriques, notamment dans les architectures *end-to-end*. Ce type de remise en question est de nature à fournir de nouvelles pistes de recherche en LI, voire à d'autres domaines connexes comme la psycholinguistique et la neurolinguistique. Enfin, la dépendance des approches actuelles aux corpus pose des questions d'ordre éthique, notamment à cause des biais qu'ils contiennent, et de la manière dont ces biais sont repris, voire amplifiés, par des systèmes entraînés sur ces corpus.

Sur le plan économique et sociétal, le domaine du TAL est porteur de développements industriels importants, permettant notamment la conception d'agents conversationnels multimodaux, l'accès aux connaissances dans les données textuelles (utiles notamment pour d'autres domaines de recherche en sciences humaines et sociales), ou la préservation du patrimoine linguistique et culturel. Globalement, la demande dans le domaine du TAL ne cesse de croître dans le monde. Les offres de postes, dans les centres

de recherche publics et privés (e.g., Google, Microsoft, Facebook, Amazon) comme dans l'industrie, augmentent aussi et les technologies de l'ingénierie linguistique deviennent un enjeu majeur pour traiter des données langagières en isolation et en interaction avec d'autres modalités. L'implantation récente de laboratoires de recherche de grandes entreprises, en particulier Google et Facebook, à Paris, offre des opportunités intéressantes au TAL français dans les prochaines années, en même temps qu'il constitue un risque de voir partir ses meilleurs éléments. Plus généralement, la place prépondérante des laboratoires privés au sein du TAL, compte tenu des avantages dont ceux-ci disposent en termes de puissance de calcul et d'efforts de développement, nous engage à repenser le rôle de la recherche publique dans ce domaine.

Unités de recherche : CLLE (UMR5263), CRIStal (UMR9189), IRISA (UMR6074), IRIT (UMR5505), LATTICE (UMR8094), LIA (EA4128), LIMSI (UPR3251), LIPN (UMR7030), LIS (UMR7279), LORIA, (UMR7503), LPL (UMR7309), LS2N (UMR6004), MoDyCo (UMR7114), PRAXILING (UMR5267), STL (UMR8163).

B. Linguistique de corpus

L'usage des corpus en linguistique a connu un développement continu, qu'il s'agisse (i) de réunir les matériaux nécessaires à la description de langues peu documentées, (ii) d'établir sur le modèle du BNC anglais ou du FOLK allemand un corpus de référence pour le français, les dialectes et les langues de France, (iii) de disposer de données de première main sur des questions spécifiques (acquisition et pathologies du langage, apprentissage d'une langue étrangère, variation phonologique, néologie, tests cognitifs, etc.) ou (iv) de construire scientifiquement les données nécessaires aux traitements informatiques et aux applications dans les industries de la langue. Dans chacun de ces domaines, des résultats appréciables ont été obtenus qui assu-

rent à la recherche française, notamment au sein du CNRS, une place au meilleur niveau international.

L'épreuve des hypothèses sur la structure des langues et leurs usages a été transformée par le recours à de grandes masses de données et l'exploitation de données orales. La fiabilité des transcriptions (conventions de notation, alignement sur le signal), la traçabilité par les métadonnées, l'assurance d'une disponibilité juridique et informatique, la conservation de la ressource initiale et de ses enrichissements ont mis en évidence la nécessité d'un *process* sous forme d'une chaîne de traitements contrôlés à chaque étape, robustes, libres de droit et pérennes.

Les unités de recherche ont à leur disposition les moyens technologiques et l'expertise de la TGIR Huma-Num (à travers le consortium CORLI / Corpus Langues Interactions), des plateformes comme COCOON (Collection de Corpus Oraux Numériques) et les relais dans les MSH. Sont venus en renfort, dans le cadre des Investissements d'Avenir, l'Equipex ORTO-LANG (*Open Resources and Tools for Language*), et du côté du Ministère de la Culture les aides de la Délégation Générale à la Langue Française et aux Langues de France et le catalogue et l'hébergement assurés par la BnF.

Le recours aux corpus – qui constituent un élément fort d'identification des unités de recherche – est aujourd'hui intégré dans la pratique des chercheurs. D'un côté, la compréhension des enjeux de la collecte et l'interprétation des productions langagières impliquent une collaboration avec l'anthropologie et les sciences sociales ; de l'autre, entre les activités de modélisation et de formalisation et la constitution et l'analyse des données, l'interface avec le TAL et l'IA, transgresse les frontières disciplinaires.

Trois défis majeurs sont à relever. Le premier est la pérennité de la conservation des données dont la croissance (et donc les coûts de maintenance) est exponentielle. Le deuxième est la préservation de la capacité à développer une recherche publique dans un domaine où les applications commerciales

conduisent à des investissements financiers considérables de la part de grandes entreprises (e.g., Google, Facebook, Amazon). Le troisième est le développement des réseaux d'échange internationaux en commençant par un engagement résolu dans les infrastructures européennes, Dariah et Clarin.

Unités de recherche : ATILF (UMR7118), BCL (UMR7320), CLLE (UMR5263), DDL (UMR5596), GIPSA-lab (UMR5216), ICAR (UMR5191), IKER (UMR5478), IRIT (UMR 5505), LACITO (UMR7107), LATTICE (UMR 8094), LIMSI (UPR3251), LLACAN (UMR8135), LLL (UMR7270), LPL (UMR7309), MoDyCo (UMR7114), PRAXILING (UMR5267), STL (UMR8163).

C. Histoire de la linguistique

L'étude réflexive des conceptualisations de la linguistique, appréhendées dans leur dimension historique, se réalise de trois façons : (i) soit elle participe de la mise en perspective de travaux contemporains qui sont saisis comme le résultat d'un progrès dans la discipline et elle tend alors à se confondre avec le domaine d'application, à l'intérieur d'unités de recherche qui n'en font pas un domaine d'élection ; (ii) soit elle restitue les travaux de phonétique, de lexicographie ou de grammaire d'écoles qui se sont développées en dehors de la tradition occidentale (écoles sanskrites, arabes, chinoises, etc.), au sein d'équipes qui se consacrent à l'analyse des langues qui ont forgé ou emprunté ces écritures ; (iii) soit elle s'attache à la dimension proprement historique des théories, une spécialité représentée par HTL, quelles que soient la langue ou la période, de l'Antiquité à aujourd'hui, alors qu'ITEM s'est progressivement désengagée de ces problématiques. On ne peut que regretter la désaffection notable qui existe pour ces études. Une certaine amnésie du temps long dans des travaux dont les enjeux sont contenus à l'intérieur de bibliographies limitées aux années immédiatement antérieures à la publication conduit à l'éviction de la réflexion critique et à la reprise

d'hypothèses qui n'ont pas bénéficié d'un véritable renouvellement méthodologique.

Unités de recherche : HTL (UMR7597), ITEM (UMR8132), Mondes iranien et indien (FRE2018).

VI. Chercheurs et ITA

A. Chercheurs

1. Effectifs de la section

La section 34 « Sciences du langage » regroupe 180 chercheurs (hors détachements de longue durée et éméritats), ce qui représente environ 1,5 % de l'ensemble des chercheurs CNRS. Les chercheurs rattachés à la section 34 et à l'InSHS représentent 7,8 % de l'ensemble des chercheurs de l'InSHS. 5 chercheurs sont également rattachés à une autre section (section 7 « Sciences de l'information : signaux, images, langues, automatique, robotique, interactions, systèmes intégrés matériel-logiciel » et CID 53 « Méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques »).

2. Profil des chercheurs

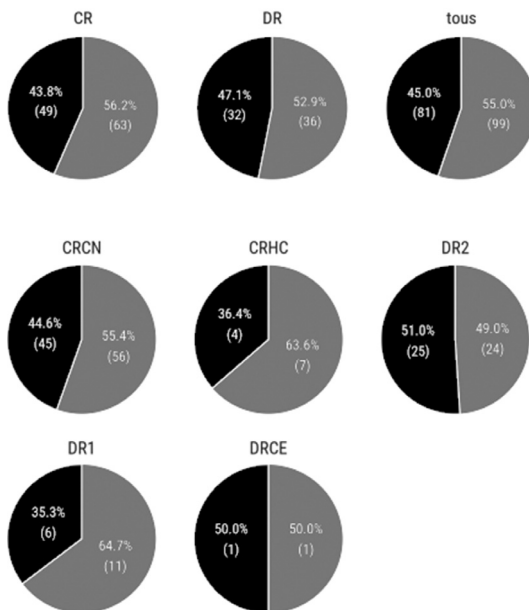
La majorité (55 %) des chercheurs de la section 34 sont des femmes. Cet avantage numérique en faveur des femmes se retrouve dans les différents corps (CR et DR) et grades, sauf dans le grade DR2, où les hommes et les femmes sont en effectifs quasi égaux. Rien n'indique donc que la parité hommes/femmes pose problème dans cette section.

L'âge moyen des chercheurs est de 48,7 ans et l'âge médian de 48 ans. L'âge moyen est sensiblement identique chez les hommes (48,5 ans) et les femmes (48,9 ans).

Par corps :

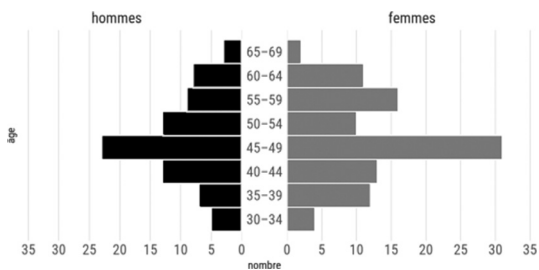
Corps	Genre	n	%	Âge moyen	Âge moyen au recrutement
CR	F	63	56,2	46,3	33,5
CR	M	49	43,8	46,5	34,8
CR	tous	112	100,0	46,4	34,0
DR	F	36	52,9	53,5	33,9
DR	M	32	47,1	51,6	33,5
DR	tous	68	100,0	52,6	33,7
tous	F	99	55,0	48,9	33,6
tous	M	81	45,0	48,5	34,3
tous	tous	180	100,0	48,7	33,9

■ hommes ■ femmes

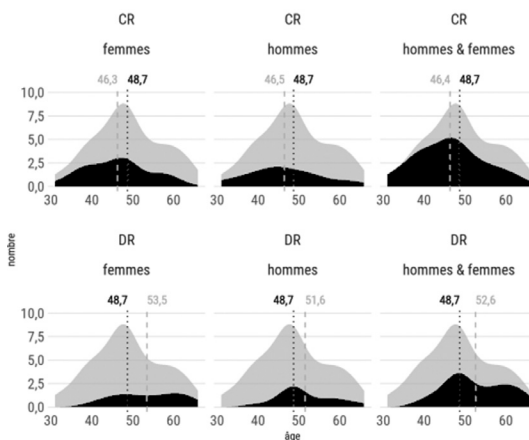


Par grade :

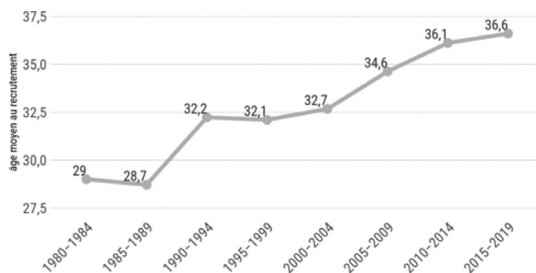
Corps	Genre	n	%	Âge moyen	Âge moyen au recrutement
CRCN	F	56	55,4	45,3	33,6
CRCN	M	45	44,6	45,8	34,6
CRCN	tous	101	100,0	45,5	34,0
CRHC	F	7	63,6	54,0	32,6
CRHC	M	4	36,4	54,8	36,8
CRHC	tous	11	100,0	54,3	34,1
DR2	F	24	49,0	51,1	32,5
DR2	M	25	51,0	51,6	34,3
DR2	tous	49	100,0	51,4	33,4
DR1	F	11	64,7	59,1	36,3
DR1	M	6	35,3	50,0	30,7
DR1	tous	17	100,0	55,9	34,3
DRCE	F	1	50,0	49,0	41,0
DRCE	M	1	50,0	60,0	32,0
DRCE	tous	2	100,0	54,5	36,5



Distribution de l'âge ■ de la catégorie ■ tous Âge moyen - - de la catégorie ···· tou

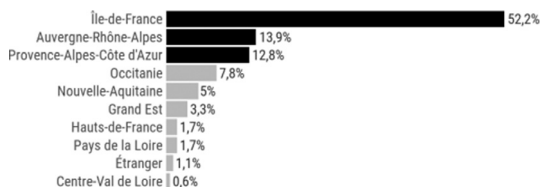


L'âge moyen au moment du recrutement pour 2015-2019 est de 36,6 ans (36,8 ans chez les hommes et 36,5 ans chez les femmes). Il convient de noter que l'âge moyen au moment du recrutement a augmenté de presque 8 ans sur les trente et quelques dernières années.



3. Localisation et répartition dans les unités de recherche

Plus de la moitié (52,2%) des chercheurs sont affectés dans la région Île-de-France. En y ajoutant les régions Auvergne-Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur, on atteint 78,9% des effectifs de la section.



Les chercheurs de la section 34 sont répartis dans 48 unités, dont 29 sont rattachées à la section (22 à titre principal). À l'inverse, parmi les 48 unités rattachées à la section 34, 19 unités n'ont pas actuellement parmi leurs effectifs de chercheur rattaché à la section. Les 10 unités rassemblant au total plus de la moitié des chercheurs de la section 34 sont les suivantes :

Unité	%
Laboratoire parole et langage (LPL)	8,3
Cognition, langues, langage, ergonomie (CLLE)	6,7
Langage, langues et cultures d'Afrique noire (LLACAN)	6,7
Structures formelles du langage (SFL)	5,6
Centre de recherches linguistiques sur l'Asie orientale (CRLAO)	5,0
Centre de recherche sur la langue et les textes basques (IKER)	4,4
Institut Jean-Nicod (IJN)	4,4
Laboratoire de phonétique et phonologie (LPP)	3,9
Grenoble images parole signal automatique (GIPSA-lab)	3,3
Histoire des théories linguistiques (HTL)	3,3

4. Concours

Les statistiques moyennes des concours pour la période 2017-2019 sont détaillées dans le tableau ci-dessous. Le taux d'admission est le pourcentage de postes par rapport au nombre de candidats admis à concourir par concours, le taux de pression est à l'inverse le nombre moyen de candidats par poste et par concours. Le nombre de candidats tous concours confondus et par concours diffèrent en raison de candidatures d'une même personne à plusieurs concours différents la même année et de disparités dans le nombre de candidats en fonction des concours d'un même corps.

Corps	Postes	Cand. tous concours	Cand. par concours	Admiss.	Press.
CR	3,0	84,7	63	5,1	20,5
DR	4,3	28,3	30	14,7	7,0

Le profil moyen des candidats peut être résumé comme suit :

Corps	Genre	%	Âge	Nb d'années après le doctorat
CR	F	50,6	36,4	4,8
CR	M	49,4	36,7	4,8
CR	tous	100,0	36,6	4,8
DR	F	45,7	46,2	15,7
DR	M	54,3	47,5	14,4
DR	tous	100,0	46,9	15,0

Les candidats classés admissibles avaient le profil moyen suivant :

Corps	Genre	%	Âge	Nb d'années après le doctorat
CR	F	49,8	34,4	3,8
CR	M	50,2	32,4	3,4
CR	tous	100,0	33,5	3,7
DR	F	50,9	44,6	16,6
DR	M	49,1	46,5	13,6
DR	tous	100,0	45,4	15,1

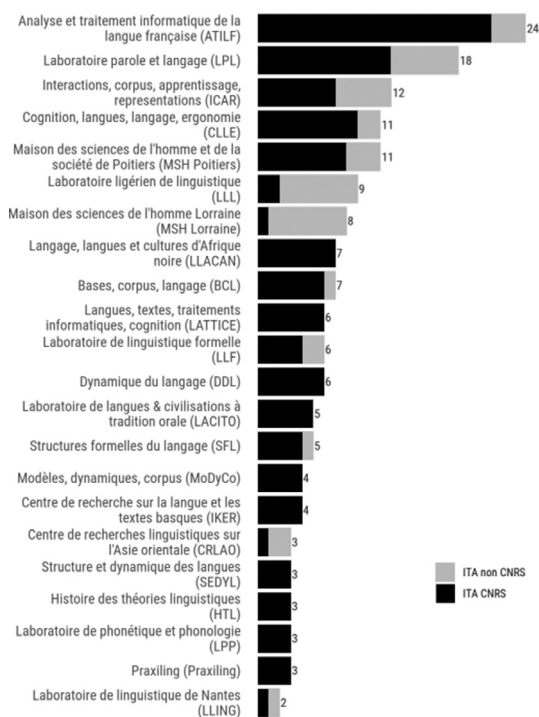
5. Internationalisation de la section

La forte internationalisation de la section 34 se traduit par la grande proportion de chercheurs de nationalité étrangère dans le corps des CR (46,2%), chiffre auquel il faudrait ajouter celui des chercheurs ayant acquis la nationalité française après leur recrutement. On peut de même noter qu'en 2017, 65% des candidats aux concours CR étaient de nationalité étrangère (Italie, Allemagne, États-Unis, Russie, etc.), et que 54,5% étaient titulaires d'un doctorat étranger (États-Unis, Allemagne, Italie, Royaume-Uni, etc.).

B. ITA

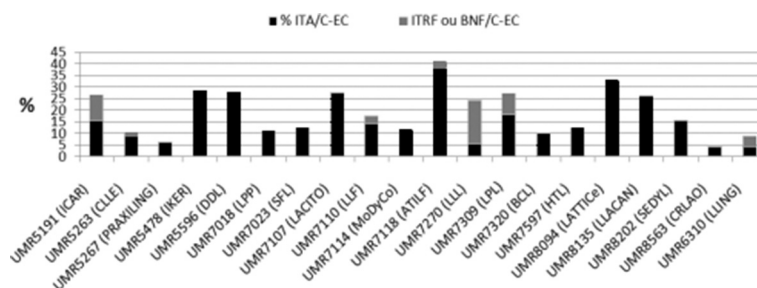
Les UMR et USR (MSH de Nancy et Poitiers) rattachées à titre principal à la section 34 intè-

grent 116 agents statutaires. Il y avait 138 agents statutaires dans les unités de la section 34 en 2014. Si l'on examine plus particulièrement les UMR, elles comptent fin 2018, selon l'Observatoire des Métiers et de l'Emploi Scientifiques du CNRS, 108 ITA plus 24 agents statutaires mis à disposition par les autres tutelles, essentiellement les universités et la BNF.



Le ratio entre le personnel technique et le collège chercheur est de 15,7% côté CNRS et de 3,5% pour les autres tutelles, soit un agent pour 5 chercheurs ou enseignants-chercheurs (source Labintel). La répartition des personnels techniques dans les UMR, quel que soit leur organisme d'appartenance, est très inégale (cf. Figure 1) : deux unités ont un ratio personnel technique/collège chercheurs de 5%; sept unités sont aux alentours de 10%; neuf unités dépassent les 25%. La disparité s'est accrue depuis 2014, date à laquelle la majorité des UMR comptaient au moins 20% d'agents de soutien et de support à la recherche.

Figure 1 : Ratio personnel technique/chercheurs & enseignants-chercheurs dans les UMR en rattachement principal à la section 34 selon leur organisme d'appartenance : ITA=CNRS ; ITRF=universitaires ou BNF.



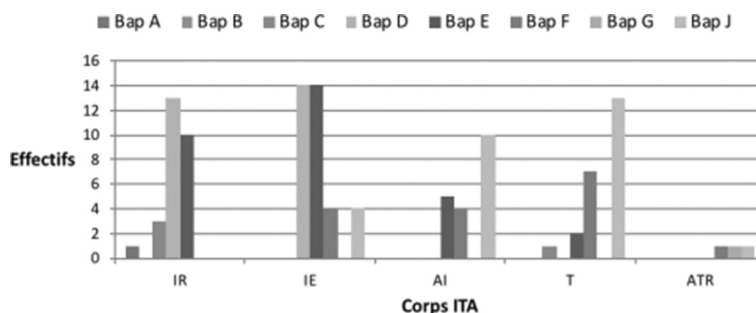
Le nombre d'ITA dans les UMR de la section est passé de 118 à 108, baissant de 10% par rapport à 2014 (notons que le nombre d'agents en CDD, que ce soit sur des postes d'agents techniques ou de chercheurs, a lui baissé de 20%). Le corps des IE est particulièrement touché. Il perd 20% de ses effectifs avec pour corollaire un rajeunissement des agents dont l'âge moyen passe de 48,7 ans à 44,6 ans : on peut penser que tous les départs à la retraite n'ont pas été remplacés dans ce corps où 10 agents avaient plus de 60 ans en 2014. L'âge moyen augmentant de façon conséquente dans les corps AI, T et ATR, l'âge moyen global des ITA de la section est malgré tout plus élevé en 2018 (47,9 ans) qu'il ne l'était en 2014 (46,8 ans).

Les branches d'activité professionnelle (BAP) qui perdent le plus d'agents sont les BAP D et J : la BAP D qui regroupe les métiers

spécifiques aux SHS voit ses effectifs diminuer de 20%, alors que la BAP J dédiée aux métiers de gestion et de pilotage voit ses effectifs diminuer de 23%. La diminution de ces effectifs étant répartie à travers les corps, le profil de répartition des agents par corps et par BAP (cf. Figure 2) reste cependant relativement stable par rapport à 2014. Dans les fonctions de soutien à la recherche (BAP C, D, E) les ITA sont en majorité des IR et des IE, alors que dans les fonctions de support (BAP F et J) ils sont en majorité AI, T ou ATR : notons que la BAP E dédiée à l'informatique et aux calculs scientifiques est la seule à avoir des représentants dans tous les corps, si l'on excepte le corps des ATR. 56% des ITA sont des femmes. Elles sont minoritaires dans le corps des IR (43%) et dans celui des ATR (33%), majoritaires dans les autres corps (au-delà de 60%).

Figure 2 : Répartition des agents ITA par corps et par BAP dans les UMR de la section 34.

BAP C : Sciences de l'ingénieur ; D : Sciences humaines et sociales ; E : Informatique, statistique et calcul scientifique ; F : Information (documentation) ; J : Gestion et pilotage.



Conclusion

La section 34 est une section dynamique, axée sur l'excellence scientifique. À côté de ses missions plus traditionnelles comme la description et la documentation des langues en danger ou la mise au point des principes et des contraintes qui gouvernent les grammaires des différents systèmes linguistiques, de nouveaux défis apparaissent, plus difficiles à appréhender, notamment en lien avec l'intelligence artificielle. L'articulation entre les résultats des sciences du langage et la didactique doit être renforcée et constitue un défi important qui devrait faire l'objet d'une réflexion.

On constate une évolution des structures qui permettent de coordonner et d'organiser le champ avec notamment le non renouvellement des fédérations ILF et TUL qui regroupaient la très grande majorité des unités de recherche en sciences du langage. Ces fédérations permettaient notamment un certain

niveau de coordination et de collaboration entre ces unités pour lequel il n'existe plus de support. Dans le même temps, le GDR LIFT nouvellement créé se met en place. L'évolution passe aussi par les Labex EFL à Paris et ASLAN à Lyon qui ont tous les deux été reconduits, par l'institut de convergence ILCB à Aix-Marseille et par l'émergence des grandes universités de recherche qui sont en train de remodeler le paysage scientifique en renforçant les unités dont les travaux et les collaborations sont les plus internationalisés.

Pour finir, on peut regretter le nombre encore trop faible de grandes revues dans la discipline en comparaison de ce dont disposent des disciplines proches comme la psychologie. La diversité des recherches en sciences du langage mériterait un plus grand nombre de supports. Le rayonnement et la place de la discipline dans le paysage scientifique sont directement conditionnés par le nombre de supports de qualité dans lesquels les recherches en sciences du langage peuvent être mises en valeur.

SECTION 35

SCIENCES PHILOSOPHIQUES ET PHILOLOGIQUES, SCIENCES DE L'ART

Composition de la section

Philippe HOFFMANN (président de section), Frédéric GABRIEL (secrétaire scientifique), Constantina BACALEXI, Paola CANTÙ TESTA, Boris CZERNY, Rachel DARMON, Paul ÉGRÉ, Pascale FEUERHAHN, Claire JOUBERT, Baptiste MÉLÈS, Delphine REGUIG, Gildas SALMON, Jacob SCHMUTZ, Solveig SERRE, Anca VASILIU, Cristina VIANO, Edgard VIDAL MARTINEZ, Richard WALTER.

Résumé

Le présent rapport s'attache à décrire le réseau des domaines, disciplines et méthodes qui déclinent les trois grands axes – sciences philosophiques, sciences philologiques, sciences de l'art – définissant le périmètre de la section 35, en décrivant – selon les choix des groupes de rédacteurs – la cartographie présente des équipes et l'état de la recherche, les thématiques émergentes et les éléments de prospective dégagés par l'expérience du Comité national. Il propose notamment des préconisations dans le domaine de l'usage des langues et du multilinguisme, ou dans celui de l'édition scientifique. Il conclut par une réflexion sur la commune présence de champs scientifiques divers, dont la mise en dialogue fait émerger une forme originale de communauté à travers un questionnement des *corpus*.

Introduction

La section 35 du CNRS se caractérise par l'originalité de sa structure, puisque pour des raisons historiques elle rassemble des équipes explorant des domaines très variés, qui conjoignent les sciences philosophiques, les sciences philologiques et les sciences de l'art, ces trois domaines fondamentaux se déclinant en disciplines et méthodes distinctes : histoire de la philosophie ; philosophie politique et sociale, et histoire des sciences humaines ; philosophie analytique, histoire et philosophie des sciences ; sciences du texte ; histoire et théorie de la littérature ; musicologie ; esthétique. Ces recherches très variées impliquent pour beaucoup un rapport dynamique aux langues dans lesquelles s'expriment les documents étudiés, et font appa-

raître le multilinguisme comme une toile de fond de la recherche et de sa diffusion en même temps que comme un effort à accomplir : le soutien aux activités de traduction, ainsi que l'illustration du français comme langue d'expression scientifique au niveau international, apparaissent comme des objectifs que la recherche française doit poursuivre avec fermeté, en particulier au sein des équipes de la section 35 – qui sont par ailleurs un lieu où se déploient de manière forte les Humanités numériques.

I. Sciences philosophiques

A. Histoire de la philosophie

1. Cartographie

Discipline reine à l'Université et aux concours d'enseignement, l'histoire de la philosophie possède également une identité distinctive au CNRS. Les chercheurs en histoire de la philosophie du CNRS assument trois tâches essentielles : a) élaborer le « matériau » primaire, sous la forme d'éditions critiques, de traductions et d'outils de travail (on pense au remarquable *Dictionnaire des philosophes antiques* ou au *Vocabulaire européen des philosophies*, projets que seul le CNRS peut porter) ; b) développer les champs de l'histoire de la philosophie qui ne sont pas traditionnellement enseignés à l'université : ce qui explique par exemple l'importance accordée à l'histoire de la philosophie arabe et médiévale, disciplines pour lesquelles il n'existe que très peu de postes à l'université ; c) enfin, l'histoire de la philosophie au CNRS se caractérise par un dialogue soutenu avec plusieurs autres interfaces majeures dont elle est généralement séparée à l'université, parmi lesquelles l'histoire des textes et la philologie, l'histoire de la théologie, les sciences des religions, l'histoire culturelle et l'histoire des sciences.

La répartition des historiens de la philosophie de la Section 35 dans des équipes presque toujours pluridisciplinaires témoigne de cette ouverture : Centre Jean Pépin (UMR 8230, Villejuif – histoire des textes, philologie), Laboratoire d'études sur les monothéismes (UMR 8584, Villejuif puis Campus Condorcet, études textuelles et sciences des religions, monothéismes), STL (UMR 8163, Lille – histoire des textes, linguistique), Centre Paul Albert Février (UMR 7297, Aix-Marseille – histoire ancienne et sciences des religions), Centre Léon Robin (UMR 8061, Paris), SPHERE (UMR 7219, Paris – histoire des sciences), CESR (UMR 6576, Tours – centre pluridisciplinaire sur la Renaissance), IRHT (UPR 841, Paris – histoire des textes, paléographie, codicologie), IHRIM (UMR 5317, Lyon – histoire de la philosophie, histoire des littératures françaises et étrangères), AnHiMA (UMR 8210, Paris – anthropologie et histoire des mondes antiques).

2. Thématiques émergentes

La philosophie antique continue à présenter pour la société un attrait évident, surtout à cause de son rôle fondateur et de l'actualité de ses modèles épistémologiques, éthiques et politiques. Loin d'être une discipline isolée, la recherche en histoire de la philosophie antique montre de plus en plus sa vocation interdisciplinaire non seulement par sa collaboration nécessaire avec la philologie mais aussi par son ouverture à d'autres domaines parallèles et nouveaux. C'est le cas du Centre Léon Robin, la plus ancienne équipe de philosophie antique du CNRS, qui mène une politique de recherche allant des éditions et traductions nouvelles de textes grecs classiques connus (par exemple la *Métaphysique* d'Aristote), à l'étude diachronique et transdisciplinaire de notions-clés (la causalité, la substance, l'âme) dans la continuité entre la philosophie antique et son héritage ancien et moderne, et de la mise en contexte de la philosophie avec d'autres aspects de la pensée, des savoirs et des techniques antiques (médecine, religions, alchimie, poétique, droit) jusqu'aux humanités numériques et à l'analyse des pratiques de la transmis-

sion et de la traduction. Ainsi le programme PhiLat consacré à la réalisation d'une base de données des traductions latines du vocabulaire philosophique grec, le site placita.org, indispensable outil de travail pour la consultation des textes antiques, des présocratiques à la fin de l'Antiquité, ou l'étude des articulations de la philosophie grecque à la philosophie arabe, qui se reflète dans plusieurs programmes. Le Centre Jean-Pépin s'attache aux différentes traditions et réceptions du néoplatonisme, mais aussi aux héritages grec et syriaque et à la postérité latine de la philosophie arabe. L'étude du néoplatonisme est menée, souvent en collaboration, dans plusieurs équipes (Centre Léon Robin, Centre Jean Pépin, LEM). D'autres traditions de recherche ont comme objets l'histoire de l'intériorité ou l'histoire des religions (Centre Jean Pépin, Centre Paul Albert Février), le LEM quant à lui étudiant spécifiquement les traditions philosophiques (aristotélicienne et néoplatonicienne) en liaison avec les religions monothéistes, établissant une liaison forte entre philosophie antique et philosophie médiévale, et développant en son sein un pôle moderniste. Ailleurs un dialogue s'instaure entre l'anthropologie et l'histoire des sociétés antiques, la construction des savoirs, la philosophie et l'histoire des sciences, avec un travail sur le lexique spécifique des sciences arabes (SPHERE), le langage, les arts plastiques et la poésie des mondes anciens (AnHiMA, STL). L'appartenance de certaines équipes au LabEx HASTEC a facilité les synergies.

L'ampleur des recherches, la variété des objets d'étude, le caractère interdisciplinaire (entre philosophie, philologie, littérature, histoire des sciences, anthropologie et histoire des religions) et le dynamisme éditorial traduit par le nombre croissant de monographies, volumes collectifs, revues de spécialité et bases de données, rendent d'autant plus urgent et nécessaire un renouvellement des effectifs de chercheurs en philosophie ancienne, menacés par les départs à la retraite et la désertification consécutive de larges pans de la discipline, à l'égard de laquelle le CNRS a une responsabilité toute particulière.

Pour la période postérieure à l'Antiquité, on assiste à un **vaste mouvement de re-périodisation**, qui apporte des précisions bienvenues aux débats déjà anciens en France de Jacques Le Goff à Alain de Libera sur le « long Moyen Âge » : si une approche continuiste s'est largement imposée dans l'histoire de la philosophie, le besoin de chercher des césures pour construire une véritable histoire n'en demeure pas moins nécessaire. Or, sur ce point, le vieux modèle qui identifiait la césure entre Moyen Âge et modernité dans la Renaissance, et éventuellement dans le nominalisme du ^{xiv}^e siècle, est désormais massivement rétrogradé vers des siècles antérieurs, au cœur de ce qu'on appelle communément le Moyen Âge. Cela permet d'intégrer les grands siècles de la scolastique des ^{xiii}^e et ^{xiv}^e siècles dans une continuité avec le siècle de Descartes et de Spinoza. Dans le champ des études de philosophie de langue arabe, l'intégration des traditions « post-classiques » obéit à un souci similaire, mettant ainsi fin au mythe d'un « déclin » de la pensée islamique après un prétendu âge d'or abbasside, en montrant en particulier la pérennité des questionnements philosophiques et théologiques durant la période ottomane – un champ en plein essor à l'étranger mais encore balbutiant en France.

On assiste également à une **révision massive du canon**, à laquelle les chercheurs du CNRS contribuent activement : alors que la philosophie enseignée en classes préparatoires et dans de nombreux départements universitaires reste fidèle à un canon très traditionnel d'une vingtaine de « grands » noms qui sont aussi ceux dont les textes reviennent inexorablement dans les programmes d'agrégation, la recherche fondamentale en histoire de la philosophie travaille activement à une modification structurelle de notre canon traditionnel, en intégrant des auteurs issus de quatre champs traditionnellement considérés comme « marginaux » : les marges « de genre » d'abord, en s'intéressant à la philosophie pratiquée par des femmes ; les marges linguistiques et culturelles, s'intéressant par exemple aux contributions syriaques, hébraïques, turcophones ou encore vernaculaires (pour l'Occident) ; les marges religieuses enfin, en réintégrant avec puissance en parti-

culier la tradition byzantine dans une histoire européenne traditionnellement très latino-centrée, ou bien des traditions religieuses particulières de l'Islam, comme le chiisme. Les sciences des religions sont l'un des pôles non négligeables qui entrent dans le périmètre de la section, laquelle dans ce domaine a un rôle important à jouer. Or, si les facteurs religieux sont de nos jours devenus omniprésents dans les discussions politiques, identitaires, patrimoniales, c'est bien souvent à l'aune d'un présentisme inquiétant qui ignore complètement la profondeur historique desdites religions, et la liaison essentielle des textes sacrés aux traditions exégétiques – le meilleur rempart contre les fondamentalismes. Bien souvent, le retour des thématiques religieuses dans la discussion publique est identifié à l'époque contemporaine. Une telle limitation est néfaste, car elle suit sans le savoir les courants religieux qui font le plus parler d'eux, alors même qu'ils sont très récents comparés à la longue histoire des confessions dont ils se réclament, et qui ont été nourries par la pratique de l'exégèse. Oublier le temps long est donc une erreur qu'il convient de combattre. En croisant les méthodes de l'histoire des textes et des concepts, la section 35 est à même d'apporter un autre regard que celui du discours confessionnel apologétique ou du discours journalistique à tel point réducteur qu'il en devient faux.

Enfin, on assiste à une **interdisciplinarité accrue**, à travers un dialogue soutenu à la fois avec l'histoire des institutions et la culture matérielle. Des travaux novateurs sur les conditions institutionnelles de pratique de la philosophie tant dans l'Islam que dans la Chrétienté médiévale ont permis de s'interroger à nouveaux frais sur les conditions d'écriture de la philosophie, son public, sa diffusion, etc. Des hypothèses nouvelles sur le rôle des juristes et des médecins, tant au Moyen Âge que durant l'âge classique, ont ainsi pu être proposées, et replacent la philosophie dans un champ culturel plus vaste, en réintégrant aussi de ce fait les auteurs médecins de plein droit dans l'histoire de la philosophie, de Galien jusqu'au *Medical Enlightenment* du XVIII^e siècle. Du point de vue de la culture matérielle, les spécialistes de philosophie moderne ont manifesté à nouveau ces

dernières années un intérêt renouvelé pour la culture manuscrite, l'iconographie, les supports matériels de cours, les expériences et les instruments scientifiques qui accompagnent la réflexion philosophique, rompant ainsi avec la focalisation exclusive sur le témoin textuel unique et canonique.

3. Prospective

Grâce au CNRS, la recherche française se situe au meilleur niveau mondial dans certains champs particulièrement rares et singuliers de l'histoire de la philosophie.

Une première priorité est donc d'assurer la pérennisation de notre expertise sur les corpus, les langues et les zones culturelles qui ne sont que très marginalement couvertes par l'université, et pour lesquels la recherche internationale est également peu active, ce qui renforce notre activité comme destination scientifique. Il est essentiel de remplacer les chercheurs aux compétences rares partis à la retraite, afin que le travail souvent immense qui a été accompli ne soit pas laissé sans héritage ni continuité.

Une seconde priorité est l'identification de domaines de l'histoire de la philosophie que la recherche française se doit de développer. Parmi ceux-ci, on peut signaler en particulier les champs suivants qui n'ont été que très imparfaitement pourvus ces dernières années :

- la première transmission de l'héritage antique et les traductions en latin, avec un intérêt particulier pour les immenses corpus patristiques, domaine pour lequel il n'y a eu aucun recrutement depuis très longtemps (voir également ci-dessous, § II. A). De même, on peut noter l'absence de travaux sur le haut Moyen Âge (les époques carolingienne, othonienne et les premières écoles du XI^e siècle), qui constitue par ailleurs un héritage où le territoire français a joué un rôle tout à fait déterminant pour l'histoire européenne.

- Il faut renouveler la recherche sur les corpus linguistiques rares tels que le syriaque, le copte, l'arménien, dont l'outillage philosophique se construit largement par la traduction

du grec. Les études sur les manuscrits coptes de Nag Hammadi ont renouvelé l'approche de la philosophie néoplatonicienne, domaine dans lequel par ailleurs doivent se poursuivre les recherches sur la tradition longue du commentarisme alexandrin (par exemple Paul le Perse ou David l'Invincible).

– Il faut développer le champ des études de philosophie byzantine, à la fois en écho avec la patristique et dans le cadre d'une meilleure cartographie de la tradition philosophique médiévale de langue grecque.

– Tant pour le monde musulman que chrétien, il convient également d'accorder plus d'attention à ce qu'il y a de proprement philosophique dans la théologie, et de ne pas cantonner notre conception de la philosophie aux corpus des commentaires de la philosophie de l'Antiquité (aristotélisme et platonisme médiéval). Dans le domaine islamique, il semble particulièrement essentiel de promouvoir des recherches sur le *kalâm* au-delà de la stricte *falsafa*; cela contribuerait également à réévaluer la dimension créative de la théologie scolastique occidentale, lieu classique d'innovations conceptuelles pour la logique comme pour la physique et qui constitue encore un immense continent largement sous-exploré.

– Une autre époque de césure sous-représentée, tant au CNRS qu'à l'université, est la période renaissante et les études sur le xv^e siècle, ce « siècle sans visage » comme l'avait appelé Zénon Kaluza. L'étude de cette période qui vit de nombreuses innovations dans tous les champs du savoir, à commencer par la philologie et l'histoire de l'Église, requiert un dialogue accru avec d'autres disciplines, notamment la littérature (comme cela se pratique à l'IHRIM).

– Une perspective novatrice, encore peu frayée, mais qui doit mobiliser les méthodes éprouvées de l'histoire de la philosophie, est offerte par l'étude des philosophies non européennes, qui devront faire l'objet d'une particulière attention dans le futur. Des domaines très riches (Inde, Chine par exemple) devraient présenter des occasions de croisement avec les études aréales, et le jury de sélection a déjà eu

l'occasion d'examiner un dossier de philosophie africaine. Ce sont des domaines qui devront être davantage explorés.

B. Philosophie politique et sociale, histoire des sciences humaines

1. Philosophie politique et sociale

Le champ de la philosophie politique au sens large (incluant la philosophie morale, politique et sociale, et l'épistémologie des sciences humaines) connaît aujourd'hui une forte recomposition. Ce domaine était jusqu'ici structuré autour de deux grands pôles : l'histoire de la philosophie politique d'un côté, et de l'autre les théories normatives d'inspiration rawlsienne et habermassienne. Par rapport à ces deux grands pôles, l'épistémologie des sciences sociales ne représentait qu'un domaine relativement marginal. Ce partage est aujourd'hui remis en cause par une imprégnation croissante des travaux menés en philosophie politique par des questionnements internes aux sciences sociales. Pour les périodes antérieures à la formation des sciences sociales, un déplacement analogue se manifeste dans la redéfinition des corpus étudiés, qui intègre désormais des travaux d'historiens et de juristes de l'époque classique et moderne, lesquels se trouvent lus et réarticulés d'un point de vue philosophique.

Les unités du CNRS ont joué un rôle moteur dans l'affirmation de cette interdisciplinarité accrue au cours de la dernière décennie : la philosophie politique et sociale ne dispose en effet pas d'unités en propre, mais est toujours pratiquée en lien avec la sociologie et la science politique (CEMS, CURAPP, CRESPPA, LIER, TRIANGLE), l'anthropologie (LEGS), ou le droit (ISJPS).

Trois courants se sont structurés dans la dernière décennie :

1/ La « philosophie sociale », qui cherche à élaborer un point de vue critique sur les phénomènes sociaux et politiques, et s'appuie sur les sciences sociales afin d'étayer cette critique. Par-delà la référence à Marx et Habermas, ce courant s'est renouvelé ces dernières années par un retour à la première école de Francfort, et en puisant dans le pragmatisme américain certains concepts cardinaux.

2/ La « philosophie des sciences sociales » cherche à nouer une articulation plus interne aux opérations conceptuelles des sociologues et des anthropologues, la critique se subordonnant ici à une description préalable des phénomènes sociaux. Ce courant, dans lequel les références à l'école durkheimienne, à la sociologie de Karl Mannheim, Max Weber et Norbert Elias jouent un rôle de premier plan, envisage l'histoire des sciences comme un aspect distinctif de la réflexivité des sociétés modernes.

3/ L'« épistémologie sociale » (au sens de l'étude des processus cognitifs à l'œuvre dans les jugements sociaux) se présente comme une exploration des déterminations naturelles de la pensée et de l'action en commun, mobilisant à la fois la biologie, la psychologie sociale, l'anthropologie et la sociologie.

À cette hybridation nouvelle entre philosophie politique et sciences sociales correspond une série de thématiques émergentes. Les questions environnementales, les rapports entre religion et politique, les relations de genre, les recompositions de la famille, la montée des nationalismes, les transformations et les crises du capitalisme, sont actuellement des domaines très dynamiques qui attirent des recherches novatrices, et qui mériteraient d'être soutenues par des profils spécifiques. Si la référence à Marx d'une part (le marxisme ayant été revigoré par la montée en puissance des inégalités), et à Foucault d'autre part (dont l'œuvre continue à susciter un nombre considérable de travaux), restent déterminantes, les références au pragmatisme américain (notamment Dewey) et à la sociologie durkheimienne et post-durkheimienne témoignent d'un profond renouvellement des formes contemporaines de la critique.

2. Histoire des sciences humaines

L'histoire des sciences humaines constitue un fort axe émergent au sein de la section 35, qui offre ainsi un biotope rare à un domaine qui n'a pas d'ancrage institutionnel hors du CNRS. Elle est représentée principalement au sein de l'ITEM (équipe « linguistique »), de l'UMR Pays germaniques, de l'UMR Savoirs Textes, Langues (STL), et du Centre Alexandre Koyré qui abrite la *Revue d'histoire des sciences humaines* ; elle concerne un nombre croissant de candidats au recrutement sur les postes de la section. Cette situation s'explique, d'une part, par une représentation historique et même précoce de ce domaine au sein de la section, par exemple à travers l'étude de la philologie et de l'herméneutique au sein de l'UMR STL, ou l'étude de l'élaboration conjointe des philologies française et allemande dans l'UMR Pays germaniques. Elle est relative, d'autre part, au fait que les caractéristiques de la section recourent des compétences essentielles pour la pratique de l'histoire des sciences humaines : centralité du texte, multilinguisme, ouverture à diverses aires culturelles, présence de spécialistes de l'ensemble des périodes historiques, expertise en histoire du livre ou de la traduction. La pratique de l'histoire des sciences humaines est de plus en plus marquée par des décloisonnements tant disciplinaires (analyse épistémologique n'ignorant pas le contexte historique, institutionnel, culturel au sens large d'élaboration des savoirs, des textes et des disciplines) que géographiques (par la prise en compte des phénomènes de transferts culturels, l'articulation de différentes échelles d'analyse : locales, nationales, transnationales...).

L'histoire des sciences humaines intéresse d'autant plus la section 35 qu'elle porte, par essence (mais pas exclusivement) sur les disciplines qui la constituent : histoire de la philosophie, histoire de l'histoire de l'art, histoire de la philologie, et sur les disciplines qui interrogent la diversité linguistique et culturelle : histoire de l'anthropologie, histoire de la linguistique... Ce domaine au développement duquel le CNRS et notamment la section 35 ont apporté des contributions majeures, connaît aujourd'hui un remarquable essor à l'échelle internationale,

comme en témoignent diverses créations récentes de centres et de revues à l'étranger. Il est essentiel que le CNRS reste activement engagé dans ces recherches.

C. Philosophie analytique, histoire et philosophie des sciences

1. Philosophie analytique

Cartographie

Il y a 25 ans, la philosophie analytique était absente ou mal vue de l'Université française, sauf au CNRS. Elle s'est implantée par deux voies : logique et épistémologie, sciences cognitives. Les laboratoires pionniers dans le domaine (IHPST, IJN, Archives Poincaré, Centre Gilles-Gaston-Granger à Aix), ont perduré ou se sont renforcés depuis 20 ans. En parallèle, la philosophie analytique s'est aussi normalisée à l'Université, avec des recrutements plus nombreux, et jouissant d'une meilleure image.

Plusieurs centres ou équipes en France ont émergé : le Centre Atlantique de Philosophie (Nantes), l'équipe Philosophie, Pratiques et Langages (Grenoble), la FRE Sciences, Normes, Décisions (Paris Sorbonne Université). De nombreux réseaux internationaux associant la France existent désormais en Europe, comme le *European Training Network* (sur la notion de désaccord, 12 Universités européennes), le Réseau EEN (*European Epistemology Network*), le Réseau sur la philosophie de la mémoire, le Réseau PLM (*Philosophy of Language and Mind*), le Réseau EUNoC (*European Non-Categorical Thinking*), etc.

Thématiques émergentes

La décennie écoulée a vu émerger un certain nombre de thématiques nouvelles :

– philosophie expérimentale : cette approche, qui vise à revisiter les problématiques philosophiques à l'aide des méthodes d'enquête de la psychologie expérimentale, a renouvelé de nombreuses problématiques en éthique, psychologie morale, philosophie sociale ;

– logiques non-classiques : objet insolite il y a une quinzaine d'année, la discipline connaît une expansion importante dans plusieurs centres européens (Genève, Paris, Amsterdam, Munich), qui en ont développé les fondements et plusieurs applications (paradoxes, énoncés vagues, raisonnement hypothétique, questions, assertion et rejet) ;

– problématiques sociétales. Un intérêt pour la philosophie de la socialité (ontologie sociale, nature des institutions, cognition de groupe, coopération, responsabilité collective, questions de genre) – avec revues dédiées et réseaux – s'est développé en philosophie analytique, de même que pour l'épistémologie sociale (réputation, confiance, construction des connaissances, réseaux sociaux, Wikipédia) ;

– philosophie du langage et de l'esprit : les années récentes ont vu émerger plusieurs travaux inspirés par la problématique des *fake news*, le mensonge et les violations de la coopération gricéenne, les énoncés dépréciatifs, la relation entre imagination, mémoire, fiction.

Politique scientifique, coloriage

« Philosophie cognitive » est l'un des mots-clés de la section 26. Lors de la mandature précédente, plusieurs postes ont été fléchés SHS en 26, mais la section 26 ne considère comme relevant de sa compétence que des philosophes « mettant la main à la pâte expérimentalement ». Cette tendance de la section 26 a été confirmée en 2019, puisque la section 35 comme la section 53 ont par exemple classé un candidat que la 26 n'a pas même jugé bon d'auditionner sur le thème SHS de la cognition sociale (malgré ses contributions expérimentales). La section 35 se demande si l'InSHS ne

ferait pas mieux de flécher ce type de poste en 35 ou en 53 plutôt qu'en section 26.

L'essor de la philosophie cognitive en France soulève une question de politique scientifique : la croissance très forte en personnels-chercheurs de l'IJN, et la très récente dissolution de l'Institut des Sciences Cognitives de Lyon, nous alertent et devraient encourager le CNRS à affecter plus de chercheurs et de ressources en philosophie et sciences cognitives à d'autres laboratoires, comme la FRE SND, ou l'équipe PRISM d'AMU, pour augmenter les chances de recrutement de jeunes chercheurs dans ce domaine en pleine expansion.

2. Histoire et philosophie des sciences

Cartographie

Grâce à leur bonne structuration nationale, l'histoire et la philosophie des sciences bénéficient d'une remarquable visibilité internationale. Les laboratoires les plus actifs dans ce domaine sont répartis sur tout le territoire métropolitain — les AHP-PReST à Nancy et Strasbourg, le CAPHÉS à Paris, le Centre Alexandre-Koyré à Paris, le Centre François-Viète à Nantes et Brest, le Centre Gilles-Gaston-Granger à Aix, l'IHPST à Paris, l'Institut de Mathématiques de Toulouse, le PHIER à Clermont-Ferrand, PLC à Grenoble, le Réseau de philosophie des sciences biologiques et médicales à Bordeaux, SPHERE et SYRTE à Paris, STL à Lille. Ces laboratoires entretiennent de nombreuses collaborations. Le CNRS joue dans ce domaine un rôle fédérateur unique au monde.

L'étude des sciences formelles bénéficie d'une grande visibilité internationale. L'histoire et la philosophie des mathématiques se sont structurées en deux GDR distincts mais non disjoints, tous deux très actifs. En histoire et en philosophie de l'informatique, la France joue actuellement un rôle pionnier dans la structuration d'un domaine jeune ; les chercheurs recrutés récemment, notamment au CNRS, contribuent activement à la constitution d'un réseau international.

Les études des sciences naturelles sont dans des situations inégales. La philosophie de la biologie et des sciences médicales a connu un essor considérable en France depuis dix ans, qui s'est traduit par un nombre significatif de candidatures brillantes et de recrutements. En revanche, l'histoire et la philosophie de la physique et de la chimie sont encore éclatées, malgré quelques recrutements récents au CNRS, et pâtissent d'un relatif manque de candidats, alors que de grandes figures partiront bientôt à la retraite.

Thématiques émergentes

L'opposition traditionnelle entre épistémologie au sens anglo-saxon et épistémologie au sens français est de moins en moins structurante, d'une part parce que la philosophie analytique ne fait plus l'objet d'un isolement institutionnel, de l'autre parce que l'accent placé internationalement ces dernières années sur l'étude des « pratiques » a permis de désenclaver une épistémologie désormais appelée « historique » plutôt que « française » et de favoriser le dialogue entre les différentes approches.

Histoire et philosophie des mathématiques sont maintenant souvent associées, notamment dans un contexte d'étude des pratiques scientifiques dans leur diversité historique et géographique, qui l'emporte sur les approches purement fondationnelles. La nécessité de définir d'une façon plus précise la nouvelle méthodologie, qui s'appuie sur différentes variantes d'histoire institutionnelle et d'épistémologie historique, l'attention portée aux aspects diagrammatiques et aux vertus épistémiques des preuves pourraient cependant laisser la place à un retour futur d'approches normatives ou fondationnelles revigorées.

Les réflexions sur le pluralisme logique, sur l'objectivité des mathématiques et sur le langage dans lequel on devrait coder les différentes théories suggèrent une ouverture vers la philosophie générale de la science. L'attention portée au raisonnement, à la justification collective et à l'agentivité rationnelle ouvrent des

passerelles vers les sciences cognitives et sociales. L'analyse historique des effets des instruments et techniques sur les pratiques et sur leur conceptualisation s'insère par contre dans une perspective plus large d'histoire des sciences.

Parmi les thématiques émergentes dans les nombreuses candidatures en philosophie et histoire de la biologie et de la médecine, on peut souligner la dialectique entre organisme et environnement, entre génétique et génomique, l'application de modèles mathématiques à la génétique des populations, l'interaction entre théorie, recherche expérimentale et diagnostic clinique, le rapport entre innovations technologiques et changement théorique.

Le nombre des candidatures en histoire et philosophie de la chimie et de la physique a été moindre et concernait l'analyse de l'impact socioculturel des styles de raisonnement scientifique ainsi que l'impact des unités de mesure sur l'architecture conceptuelle des sciences.

Politique scientifique, coloriage

Le CNRS recrute régulièrement de jeunes philosophes et philosophes historiens. Il serait souhaitable d'encourager le recrutement d'historiens des sciences, éditeurs de textes, attentifs aux contextes sociaux et à la diversité des pratiques, qui sont actuellement mal servis dans les concours, tant au CNRS qu'à l'Université. L'absence de transmission étant en passe de décourager les jeunes étudiants, la France risque de perdre ce qui faisait l'une de ses spécificités. Les humanités numériques devraient pourtant permettre un renouvellement de la discipline, en complément aux méthodes éprouvées d'édition critique.

On peut également espérer que se poursuive la collaboration entre, d'une part, la philosophie analytique du langage et de l'esprit, et, de l'autre, l'histoire et une philosophie des sciences. L'un des terrains communs est celui des enjeux des nouvelles technologies, étudiés simultanément par les sciences cognitives (la capacité à construire de l'information gra-

phique et à raisonner graphiquement, la perte d'autonomie, la perte de capacités cognitives du fait des nouvelles technologies, la philosophie de la robotique, les questions éthiques) et l'histoire et la philosophie des sciences (correspondance preuves-programmes en philosophie de la logique, assistants à la démonstration en philosophie des mathématiques, nouveaux instruments de mesure et méthodes en philosophie des sciences naturelles, étude des enjeux éthiques et politiques de l'intelligence artificielle).

II. Sciences philologiques

A. Sciences du texte

La philologie est la base du travail sur les textes, elle est donc au cœur des disciplines représentées dans la section 35, de la philosophie à la musicologie en passant par les littératures, et elle concerne au premier chef les études aréales : comment faire un travail solide dans ce domaine sans une approche fine des langues ? (voir aussi le § IV.A). On oublie trop souvent que la philologie concerne toute la chronologie et toutes les géographies. Elle est aussi un rempart contre la propagande, les idéologies partisans ou les interprétations superficielles ou sciemment biaisées. À ce titre, on aurait tort de la percevoir comme un simple travail minutieux d'antiquariat.

Aussi, l'intérêt souvent faible accordé aux techniques de la philologie n'est pas justifié (paléographie, codicologie, ecdotique, mais aussi papyrologie ou épigraphie, etc.), et il est d'autant plus dangereux que ces savoirs hautement techniques pourraient se perdre alors que la France s'est toujours illustrée dans ce domaine, et tout particulièrement au CNRS (puisque les travaux philologiques se font sur le temps long), avec par exemple l'IRHT et le LEM, où les chercheurs fondent

souvent leurs travaux d'histoire doctrinale sur la production d'éditions critiques – les médiévistes, notamment, ayant fréquemment une double compétence philologique et philosophique.

Il faut donc revaloriser le travail d'édition critique : on ne met ici sous ce terme ni les éditions de textes déjà édités et réédités depuis longtemps et de façon critique (comme c'est le cas général en latin classique) ni le résultat de collations effectuées sur des éditions anciennes, faute de tradition manuscrite (comme c'est souvent le cas en néolatin). Dans ces deux cas de figure, l'accent est mis en fait sur la traduction annotée, tandis que les textes ne sont transformés que très marginalement ou même pas du tout. On appelle éditions critiques celles qui sont effectuées sur des textes transmis sous forme manuscrite, qui n'ont pas encore été imprimés (éditions 'princeps') ou qui ne l'ont jamais été depuis l'Ancien Régime. Préparer une édition princeps, classer pour la première fois les manuscrits d'un texte qu'on lit toujours dans une édition ancienne, sont des travaux qui exigent de grandes compétences et qui mériteraient d'être pris davantage au sérieux.

La philologie latine classique s'essouffle, contrairement à la philologie grecque, faute de sources nouvelles et d'apport suffisant du côté de la papyrologie. Pour maintenir cette philologie latine et la revivifier, il faudrait donner la préférence aux personnes qui travaillent sur le latin tardif, le latin médiéval ou le néolatin, car il existe encore des ressources immenses en ce domaine, ou encore sur l'épigraphie latine (où un courant continu de trouvailles subsiste encore). Pour le latin tardif, citons seulement l'apport exceptionnel de découvertes comme celles qui ont porté sur Chromace d'Aquilée (J. Lemarié, R. Étaix), Fortunatianus d'Aquilée (L. Dorfbauer), et bien sûr Augustin (J. Divjak, R. Étaix, Fr. Dolbeau, C. Weidmann, G. Partoens, etc.) : le massif augustinien est une sorte d'Himalaya qu'on est encore loin d'avoir exploré sous tous ses aspects. De ce point de vue, il faut rappeler avec la plus grande insistance que, depuis longtemps, la France s'est illustrée au niveau

mondial dans ce domaine, l'Institut d'Études Augustiniennes (désormais rattaché au LEM) étant un fleuron internationalement reconnu, et pourtant il ne comporte plus aucun chercheur CNRS. Plus largement, les études patristiques dans lesquelles la France a joué un rôle central, sont en perte de vitesse, non pas en raison du manque de jeunes chercheurs brillants, mais à cause du manque de recrutement. Ainsi, l'Institut des Sources Chrétiennes (Lyon), qui fait un travail d'édition et de traduction essentiel, n'a pas connu de recrutement de chercheur depuis plus de 10 ans. Si ce domaine est important, c'est qu'il reste encore sous-exploité comparé à sa richesse patrimoniale et thématique (au croisement de la philologie, de la rhétorique chrétienne, de l'histoire des dogmes, de l'histoire, interdisciplinarité dont témoignent les liens nourris avec la section 32). En outre, il ne concerne pas seulement le grec et le latin, mais aussi bien des langues orientales. Si le travail ecdotique et philologique ouvre la voie à une compréhension doctrinale beaucoup plus riche et profonde de la genèse des textes, il doit s'accompagner d'un décloisonnement des aires linguistiques (arabe, hébraïque, syriaque, etc.), car les textes circulent autour de la Méditerranée.

Quant aux ressources du latin médiéval et du néolatin, elles sont encore plus grandes que celles du latin tardif, elles sont de plus à la racine de notre culture européenne et mettent directement en valeur notre patrimoine livresque. Face à la fermeture massive des postes (et même des départements) de lettres classiques, le CNRS a un rôle déterminant à jouer d'autant que la philologie est l'un des lieux où les humanités numériques se développent de manière particulièrement dynamique.

B. Histoire et théorie de la littérature

Est-il possible de donner aujourd'hui du paysage des études littéraires une vision unifiée ? Ces études concernent en effet des

périodes, aires linguistiques et géographiques très vastes (littérature antique, médiévale, moderne, contemporaine, française, comparée, étrangère...) et des approches extrêmement diverses selon les genres (théâtre, poésie, essai, roman, prose d'art) et selon les méthodologies et objets privilégiés (problématiques éditoriales, théorie littéraire, rhétorique et poétique, langue et stylistique, littérature et médias, etc...). On peut cependant tenter de dégager trois grandes tendances de fond dans ces études :

– (1) la réflexivité grandissante de la discipline : la notion de littérature est une invention récente ; le mot prend son sens actuel dans le dernier tiers du XVIII^e siècle et sa signification est construite dans le courant du XIX^e siècle. Un mouvement de fond consiste à examiner l'historiographie littéraire pour comprendre comment cette notion a été construite, ce qui existait avant elle sous d'autres noms, et ce qu'elle nous permet de penser aujourd'hui. La prise en compte des conséquences méthodologiques de cet anachronisme permet de mettre en perspective tous les courants critiques littéraires des XIX^e et XX^e siècles y compris dans leurs clivages polémiques (histoire littéraire *vs* réaction structuraliste par exemple). Cette réflexivité des études littéraires à l'égard d'elles-mêmes permet également de définir quelles logiques finalistes ont présidé à l'établissement d'un patrimoine littéraire institutionnalisé et de remettre en question la sacralisation liée à la définition de ce canon. L'attention peut alors se porter sur des genres ou des auteurs longtemps qualifiés de mineurs et interroger les causes de cette hiérarchisation. On peut évoquer, à titre d'exemple, la remise en question de la dissociation entre la littérature et les « belles lettres » pour les siècles anciens, entre littérature et document pour les productions contemporaines. Les recherches actuelles remettent en question la mise à l'écart des littératures écrites dans des langues non nationales, telles que le latin dans la littérature européenne de la première modernité, les dialectes ou, pour la période contemporaine, les littératures dites francophones ou créoles que les études post-coloniales cherchent à revaloriser. L'enjeu est de sortir de l'évidence d'un

corpus littéraire stable immédiatement donné au chercheur alors que celui-ci doit d'emblée se saisir du texte comme produit construit par l'histoire : l'histoire de sa rédaction, de sa publication et de sa réception dans le temps long. Une historicisation du concept même de « littérature » est engagée, qui en situe la spécificité dans la modernité européenne, pour rendre leur visibilité à des pans de production et de pratiques discursives impossibles à constituer en objets dans le cadre des études littéraires postromantiques, ni dans celui de leurs coordonnées national(ist)es : orales, populaires, vernaculaires, traductionnelles, multilingues et hybrides, inter-artistiques, et maintenant inter-médiales et hypertextuelles... Ainsi, le concept de « transfert » largement appliqué à l'origine aux recherches menées par, entre autres, Michel Espagne, dans le domaine de la philologie, a été largement repris dans les travaux sur les identités littéraires et les caractéristiques des productions des littératures dites nationales afin de préciser le caractère fécond des échanges et influences multiples entre les écrivains de langues et de cultures distinctes. Il n'est plus possible aujourd'hui d'évoquer « une littérature » sans mentionner les échos et relations avec d'autres créations littéraires « étrangères » créant par là-même une horizontalité dont l'investigation s'avère le plus souvent indispensable.

Ces nouveaux objets transversaux forment une tendance marquée, dont le CNRS est vraisemblablement seul à pouvoir s'emparer pleinement, malgré les expériences d'interdisciplinarité conduites dans les universités, favorisées mais aussi fortement contraintes dans les trains de réformes actuelles. Dans ce contexte, la part réduite des personnels, laboratoires dédiés et nouveaux recrutements en littératures, et spécifiquement en littératures et cultures étrangères ainsi qu'en langues et traduction – et par conséquent la capacité de dialogue international avec des pensées du littéraire et du culturel autres que francophones – constitue un point faible indéniable.

– (2) L'ouverture interdisciplinaire : aucun chercheur en littérature aujourd'hui ne considère le texte littéraire comme un objet clos,

réservé, et isolé des autres formes de pensée et d'expression humaines. La spécificité de l'hérméneutique littéraire, qui consiste à considérer le texte comme un lieu naturel d'élaboration de la pensée dans la forme et par la forme, permet alors de composer une histoire spécifique des formes de savoir. Elle s'enrichit d'un décloisonnement de plus en plus systématique par un dialogue intense avec l'histoire des idées, de l'art, du livre, la linguistique, la philosophie, la sociocritique, et bien d'autres disciplines toutes concernées par l'existence de textes littéraires dans l'histoire. La réflexion sur le rapport de l'œuvre littéraire à son support permet d'éclairer les renouvellements liés aux nouveaux médias (élaboration de romans contemporains sur des blogs participatifs par exemple, traductions collaboratives en wiki) par l'étude des bouleversements qui ont suivi la naissance de l'imprimerie : elle permet également de montrer comment la publication de certaines œuvres sous forme d'épisodes dans la presse périodique a influencé non seulement leur mise en forme, mais aussi leur contenu diégétique, ou de mettre en lumière la dimension collective, souvent occultée, qui a présidé à l'émergence de nombreuses créations littéraires.

– (3) Ces deux premiers gestes, qui ont l'allure de décentrement successifs, autorisent un recentrement sur le texte qui ne se confond plus avec un textualisme étroit, mais qui confirme une spécificité ou « école » française historique dans la recherche littéraire internationale, tout en permettant de repenser le support textuel lui-même, notamment grâce à la pratique de l'édition numérique, ou par les expériences en humanités numériques (modélisation, mapping, traitements quantitatifs de grands corpus). Cette mutation importante, déjà bien engagée, s'accélère notablement sous l'impulsion de grands projets soutenus dans les institutions telles que les Idex et Labex (Obvil, Comod, par exemple). La proposition du lancement en France d'une action nationale pour les éditions savantes dans le cadre d'une initiative structurée, pilotée et gérée par les laboratoires sous tutelle du CNRS, paraît dès lors extrêmement pertinente et donnerait effectivement une visibilité pré-

cieuse à l'expertise française en matière éditoriale. Dans ce cadre, le soutien des ingénieurs de recherche est indispensable et leur recrutement ne saurait être négligé.

L'état du recrutement CNRS dans les littératures est préoccupant, et son évolution dans les années récentes plus encore : pour 1 chercheur CNRS en littérature il y a actuellement 20 à 25 enseignants-chercheurs universitaires, alors qu'en philosophie le rapport est de 1 à 5. Or il est dangereux de s'appuyer principalement sur le potentiel universitaire dans ces disciplines, qui en l'état actuel de pénurie et de précarité, ne permet pas de mener des activités de recherche suivies et cohérentes.

Pour assurer l'efficacité des recrutements et leur pleine correspondance au périmètre de la section 35, il est indispensable de concevoir des coloriations incorporant les littératures pleinement et sans ambiguïté, dans leur dimension poétique, et ceci dans la pluralité des langues.

III. Sciences de l'art

A. Musicologie

1. Cartographie

À l'exception de l'IReMus, seule UMR de musicologie en France, les musicologues du CNRS travaillent, aux côtés des enseignants-chercheurs, au sein de différentes UMR interdisciplinaires comme le CESR de Tours, STMS-Ircam, l'IRHT, l'IDEMEC d'Aix-Marseille, le CESC de Poitiers (à noter que l'IHRIM de Lyon-Saint-Étienne-Clermont-Ferrand et le PRISM d'Aix-Marseille Université ne comportent pas encore de chercheur CNRS en musicologie). La politique menée à travers les IdEx a favorisé par ailleurs les synergies avec l'apparition de regroupements interdisciplinaires spécifiques autour de la musique faisant inter-

venir les sciences dures et les SHS (projet GREAM de Strasbourg et Collegium Musicae de Sorbonne Université). La recherche musicologique bénéficie actuellement du dynamisme de ses sociétés savantes, la Société française de musicologie (1917-), la Société française d'ethnomusicologie (1983-), la Société française d'analyse musicale (1985-), l'Association francophone d'informatique musicale (2002-) et l'International Association for the Study of Popular Music branche francophone d'Europe (1981-) mais aussi des actions de l'IMS (International Musicological Society), actuellement dans une démarche d'ouverture thématique et géographique, au-delà des traditionnels réseaux américains et européens.

2. Évolutions récentes de la recherche

La musicologie française a longtemps privilégié l'approche historique et philologique, qui l'ont conduite à s'investir dans les éditions critiques, les catalogues thématiques et les entreprises de publications systématiques qui font sa renommée à l'échelle internationale ; parallèlement s'est développée une tradition forte d'analyse musicale (selon différentes méthodes) et d'ethnomusicologie. Ces champs continuent à être féconds, et ils sont en train de se renouveler au contact du développement de l'informatique musicale et des humanités numériques. Mais à l'exception de l'ethnomusicologie, ils ont le plus souvent placé l'objet partition au cœur de la recherche scientifique. Or, quitte à être un peu schématique, on observe actuellement un élargissement des interrogations, des partitions elles-mêmes vers les pratiques musicales.

De fait, la recherche se diversifie en abordant aussi bien les processus créateurs (approches génétiques), les *performance practice*, et les processus de réception. L'un des champs particulièrement prometteurs dans les années qui viennent (lié, notamment, mais pas uniquement, à l'apparition de doctorats de recherche pratique) concerne la recherche sur les interprètes, par les interprètes ou encore avec les interprètes, selon des méthodes qui vont

encore se diversifier. Notons que ce déplacement épistémologique a permis d'ouvrir la recherche musicologique au champ des musiques populaires, actuellement en plein développement.

Parallèlement, la musicologie s'est enrichie dans une perspective interdisciplinaire qui l'a ouverte à de nouvelles interrogations en la faisant rencontrer les *cultural studies*, les *gender studies*, la sociologie ou encore l'économie. L'un des champs en développement concerne le dialogue art/science, notamment entre la musicologie, l'histoire culturelle et certaines sciences dures comme l'acoustique autour des *sound studies* qui interrogent très largement la notion de culture sonore. D'autres champs en développement concernent la phonographie, les liens entre musique et identités (nationales, sociales, genrées), musique et politique, musique et diplomatie culturelle dans une perspective transnationale, musique et technologie, pédagogie musicale et cognition.

3. Orientations et préconisations

On soulignera un contraste frappant entre le foisonnement et le renouvellement actuels de la recherche musicologique française, et la pénurie inédite des postes de musicologie à l'université (en 2018 : 1 poste de MCF et 2 postes de PR mis au concours, en 2019 : 4 postes de MCF et 3 postes de PR mis au concours). Ces derniers sont devenus monnaie rare car les supports de postes ont souvent été transférés au profit de disciplines comme les arts du spectacle ou les études cinématographiques. Les postes sont par ailleurs souvent réorientés dans les domaines de l'informatique musicale, de l'audiovisuel et des musiques populaires. Or le Comité national a pu mesurer ces trois dernières années qu'il existe un vivier d'excellents jeunes chercheurs, qui n'a sans doute jamais été aussi large (une bonne vingtaine de candidatures musicologiques chaque année sur le concours CR). Face à cette situation critique, il paraît souhaitable que le CNRS continue à considérer la musicologie comme faisant pleinement partie du périmètre de la section 35 ; que les recrutements restent

ouverts à une grande diversité d'approches ; que l'InSHS veille à un équilibre, dans les affectations des futurs recrutements, entre l'IReMus et les unités CNRS en région ; que la définition des colorriages soit formulée de manière suffisamment large pour ne pas exclure par principe certaines disciplines comme la musicologie, minoritairement représentée dans la section.

B. Esthétique

La recherche en esthétique et philosophie de l'art au CNRS se concentre essentiellement dans trois UMR : ACTE, le CRAL, et THALIM.

La conception « romantique » de l'esthétique, accompagnée de la sacralisation du « grand art », a longtemps prévalu dans la recherche. C'est seulement au cours des dernières décennies qu'elle a été contestée. Cette réorientation a pris différentes formes :

- réévaluation de la dimension gnoséologique et ontologique de l'esthétique (ce mouvement, fort en Allemagne et aux États-Unis, commence à s'imposer en France aussi) ;

- extension de son domaine de compétence à des formes d'expériences sensibles autres que les beaux-arts : arts populaires ou mineurs, comme le jazz, le graffiti, le design ; esthétiques non humaines, des animaux ou des paysages naturels ; entités non artistiques telles que les atmosphères ou les émotions ; esthétique des modes de vie, des styles, et des loisirs (esthétique du social) ; expériences quotidiennes, ou « somaesthétique », etc.

- mise en cause de l'approche patrimoniale, souvent liée à des formes de nationalisme méthodologique au profit de l'étude des circulations transnationales.

La philosophie pragmatiste a beaucoup contribué à ce tournant. Les études de Jean-Marie Schaeffer sur la fin du paradigme romantique, sur la fin de l'exception humaine et sur l'expérience esthétique sont un guide fondamental pour comprendre les enjeux de cette extension du domaine de l'esthétique. On

assiste notamment à un élargissement de la notion d'esthétique, qu'on peut comprendre comme un retour à sa première signification datant du XVIII^e siècle de « science de l'aisthesis », du sensible et de l'expérience sensorielle au sens large.

IV. Les langues et la section 35

A. Les langues et les laboratoires

Dans le périmètre de la section 35 se trouvent plusieurs USR appartenant aux UMIFRE (unités mixtes internationales-formations de recherche à l'étranger). Grâce à ces dernières, on a une grande diversité des langues au-delà de l'anglais à la Maison française d'Oxford (USR 3129), de l'espagnol à l'USR 3337 Amérique latine (Mexique et Pérou) ou de l'allemand (Centre Marc-Bloch USR 3130).

Au Centre franco-russe de Moscou (USR 3060), un séminaire étudie les langues et littératures française et russe, y compris la traduction et l'interprétariat français-russe. Mentionnons aussi l'UMR 8224 Eur'Orbem créée en 2014 par la section 35, couvrant les cultures et littératures de l'Europe centrale, orientale et balkanique, dont l'axe « langues et cultures populaires et savantes » inclut l'oralité et le *Dictionnaire de motifs étologiques chez les Slaves orientaux*.

L'arabe est étudié dans l'UMR SPHERE, mais aussi au Centre Jean-Pépin (philosophie arabe, manuscrits philosophiques arabes et syriaques [base Abjad]), et le LEM comprend des spécialistes des littératures philosophiques en arabe et en persan. Au CEFAS (USR3141), seul centre de recherche non arabe de la péninsule arabe, l'arabe est une des langues de publication, mais avec la difficulté particulière d'océrisation qui retarde la parution sur Open

Edition, et l'éloignement géographique des responsables de publication (dont une éditrice restée au Yémen après le départ du centre). Le CEFAS a co-porté l'ANR OmanSAM sur les langues sudarabiques modernes et consacré un numéro de sa revue *Arabian humanities* à la poésie dialectale et aux musiques traditionnelles péninsulaires, domaines prometteurs qui offrent aussi des perspectives de valorisation grand public.

L'Institut français de Pondichéry (USR3330) possède la plus importante collection mondiale de manuscrits Shivaïtes sur feuille de palme dont plusieurs en sanskrit (patrimoine mondial de l'UNESCO <http://www.ifpindia.org/digitaldb/online/manuscripts/>). L'axe « Indologie » étudie les traditions textuelles indiennes : sanskrit (langue érudite), mais aussi tamil, domaine pionnier dans l'université indienne (littérature, culture, histoire, place dans la modernité par exemple comme langue répandue sur le web).

L'institut français d'études anatoliennes (IFEA) Georges-Dumézil d'Istanbul (USR3131) consacre le blog Dipnot (en turc « note de bas de page » <https://dipnot.hypotheses.org/>) aux réflexions de ses chercheurs sur des questions d'actualité, en partie en turc. Le turc est une langue de publication et d'archives, mais la recherche est plutôt archéologique et concerne moins les textes ou les manuscrits. La table de matières de la *Bibliographie d'Istanbul 2000-2013* est bilingue turc-anglais (<https://books.openedition.org/ifeagd/307>).

La composante japonaise de l'USR3133 Asie orientale (Institut français de recherche sur le Japon à la Maison franco-japonaise UMIFRE19) acquiert pour sa bibliothèque toutes les traductions en japonais d'ouvrages SHS français et d'ouvrages des chercheurs japonais sur la France, ainsi qu'un « corpus raisonné d'ouvrages de culture française classique ». Un atelier organisé à cette bibliothèque concerne la traduction franco-japonaise.

Au Centre franco-chinois (USR3133 sous l'égide de l'université de Tsinghua à Pékin, orienté principalement vers les sciences sociales et la période contemporaine), les confé-

rences et colloques sont en français avec traduction chinoise. La traduction littéraire (français-mandarin) et la diffusion de la littérature française en Chine sont l'objet du Prix Fu Lei, créé en 2009. Il est la seule récompense existant aujourd'hui dans ce domaine en Chine <http://beijing-cfc.org/category/prix-fu-lei/presentation-prix-fu-lei/?lang=fr>

B. Le français et le multilinguisme

La récente étude de l'OST (Observatoire des sciences et des techniques) intitulée « position scientifique de la France 2000-2015 » (<http://www.hceres.fr/PUBLICATIONS/Rapports/Rapport-sur-la-position-scientifique-de-la-France-dans-le-monde-2000-2015>) aide à nuancer des idées reçues : même si l'anglais est considéré comme la langue scientifique internationale, cela ne vaut pas pour toutes les disciplines et tous les types de publication. Aujourd'hui, comme il est indiqué dans l'étude précitée, on ne peut plus affirmer que seuls les pays occidentaux de l'hémisphère nord produisent de la science sérieuse. Car la recherche est multipolaire et cette tendance va s'accroître les prochaines années, vu les investissements sur la recherche des nouvelles puissances émergentes de l'Asie, de l'Amérique et de l'Afrique.

Certes, là comme ailleurs on ne reconstruit qu'en tenant compte du passé, y compris celui d'une géopolitique du langage. Mais ces configurations propres au xx^e siècle sont loin d'être les mêmes que pour le xxi^e siècle. D'ici quelques années, il ne serait pas impossible de voir arriver des termes en chinois ou indien, par exemple. Et d'excellents chercheurs travaillent sur des lieux aussi exotiques que New Delhi et Chennai, Pékin ou Taiwan, Santiago ou Buenos Aires, Mexico et Sao Paolo. Il nous semble important, en amont, de reconsidérer les recherches effectuées par les nouveaux pôles régionaux de développement international des sciences. Un regard plus fin et informé sur les producteurs internationaux de science

et sur la production des savoirs est préalable à toute classification trop confortable ou rapide, entre des pays participant aujourd'hui au travail scientifique.

Si le CNRS ne réalisait pas cet effort sur la langue française et sur le multilinguisme, en particulier dans notre section 35 où la diversité culturelle et linguistique est intrinsèque aux sujets étudiés (la philosophie et la philologie, la connaissance des langues et des cultures, ainsi que les travaux sur les arts et les aires culturelles⁽¹⁾) qui d'autre pourrait le faire? Tout comme sans le CNRS, sans l'Institut Max-Planck allemand ou le Riken japonais il n'y aurait pas de recherche performante en France, en Allemagne ou au Japon, sans une langue propre il n'y aurait pas de sens de travailler sur la diversité culturelle et linguistique!

Afin de mieux cerner ce nouveau paradigme en train de naître, et d'affronter les questions politiques et scientifiques qu'il soulève, il est important d'accompagner ces mutations d'un triple point de vue :

1) L'InSHS doit se donner les moyens de les accompagner avec des aides économiques et des formations appropriées avec une logique française et européenne. Et avec, peut-être, une réflexion particulière sur la place de l'Angleterre « post-Brexit ». L'objectif serait une meilleure reconnaissance de la langue française comme l'une des langues scientifiques internationales. Cette initiative devrait être accompagnée d'une politique plus explicite en faveur de l'usage du français dans les instances internationales de promotion et évaluation de la recherche, en appuyant aussi, politiquement et économiquement, les publications françaises d'intérêt scientifique⁽²⁾.

2) Il faut aussi faire évoluer la connaissance des technologies de traduction et les intégrer aux outils d'édition dans les domaines relatifs à la section 35, pour l'intégrer dans un grand système universitaire multilingue mondial, où l'Europe et son expérience de diversité linguistique aurait toute sa place.

Il importe de se donner les moyens pour générer des métadonnées, des descriptions et des programmes en langue française⁽³⁾.

3) Reconnaître pleinement l'importance des activités de traduction dans les carrières des chercheurs et des IT dans le processus de recherche est un préalable à une meilleure insertion de la recherche française dans le contexte international. Les systèmes de Valorisation des Activités de Recherche des Chercheurs (RIBAC) et de l'outil VariSHS qui s'adresse aux ingénieurs des BAP D, E et F ignorent tout simplement la traduction, tandis qu'on y trouve d'autres activités telles que la « collecte et exploitation de données », les « expertises scientifiques », les « productions multimédias » et les « activités éditoriales ». Par ailleurs les IT doivent pouvoir prendre toute leur place dans les projets de traduction et leur apport doit être mieux reconnu. Les profils d'IT spécialisés dans la traduction scientifique devraient être mis aux concours, notamment dans les domaines d'étude de la section 35, au lieu d'inciter à la publication en anglais.

V. Édition scientifique et gestion des carrières

Nous attirons l'attention sur les dangers de la mutualisation et la tendance croissante à déplacer hors laboratoire les emplois de soutien à la recherche dans des domaines aussi spécifiques que ceux rassemblés dans la section 35.

Les activités d'appui à la recherche pour la section 35 sont très larges : un fort secteur d'édition savante, la production multimédia, audio et vidéo, le traitement quantitatif de grandes masses de données numérisées, la production et l'analyse des données, etc. Elles s'appuient sur des compétences propres à chaque domaine scientifique. Il y a aussi bien des philologues, des analystes de sources antiques ou modernes que des éditeurs de revues savantes à renommée internationale, des éditeurs numériques et des spécialistes des bases de données complexes. Ces métiers ne peuvent fonctionner qu'insérés dans chaque équipe de recherche et en lien étroit avec les chercheurs.

Ainsi, le nombre de revues dans le champ scientifique de la section 35 est en augmentation mais nous constatons que les postes de secrétariat de rédaction et d'édition ne sont plus affectés aux laboratoires. Il est important de ne pas isoler les personnes en charge des revues et de favoriser les échanges entre professionnels à travers des réseaux, mais il est aussi important que ces personnes soient insérées dans les laboratoires pour faciliter la collaboration entre chercheurs et éditeurs.

Le secteur émergent des Humanités numériques demande de nouvelles compétences. Mais celles-ci doivent toujours être corrélées avec des thématiques scientifiques. Il est important que cette double compétence technique et thématique soit reconnue par les institutions pour favoriser l'éclosion d'un vivier de candidatures. Des grands équipements existent comme par exemple Huma-Num et ils proposent des services techniques importants autour de l'accès et de la préservation ; des plateformes plus spécifiques existent pour l'édition et l'exploitation des données scientifiques, comme EMAN (<http://eman-archives.org>) ou les logiciels d'édition et d'analyse textuelle du Labex Obvil (Observatoire de la Vie Littéraire, <http://obvil.sorbonne-universite.site/developpements>). Ces outils demandent des connaissances spécifiques en informatique, en édition et en documentation mais aussi des services d'accompagnement destinés aux utilisateurs de ces plateformes.

L'informatisation croissante des techniques provoque des mutations dans les profils de poste et une re-spécialisation des compétences qui doit être reconnue en termes de promotions et d'attractivité des emplois. Cela concerne en particulier les métiers de la documentation (Bap F). Enfin la section 35 rassemble de nombreux personnels de la Bap D (analyse des sources, analyse et production des données), dont les effectifs baissent régulièrement alors que les métiers de cette Bap alliant compétences disciplinaires, ouverture interdisciplinaire et savoir technique sont indispensables pour l'évolution des outils et des domaines d'étude des laboratoires de la section 35, le maintien et la valorisation de cette Bap doivent

donc faire l'objet d'une attention particulière de la part des tutelles.

Le développement d'outils et bases de données numériques, ainsi que la multiplication des revues et publications (tout support confondu, le papier ou le double support ne sont pas à négliger) demandent non seulement de nouvelles compétences, mais aussi de nouveaux postes pérennes à la hauteur des besoins. Or la multiplication de financements limités dans le temps (appels à projets) engendre un accroissement de la précarité, compromet le maintien et l'amélioration des connaissances, la transmission de savoir et savoir-faire, la pérennité des données numériques.

VI. Les humanités numériques

Les humanités numériques (HN) sont à la mode mais leur définition a fait longtemps débat ; la définition la plus stabilisée les présente comme un ensemble de méthodes et d'outils numériques applicables à l'enseignement et à la recherche en littérature et en sciences humaines et sociales. Sans ancrage disciplinaire, ces HN fonctionnent à vide.

Elles se fondent sur des corpus numérisés, édités, annotés, exploités, sauvegardés. Mais il faut alors non seulement une maîtrise du numérique mais aussi une connaissance fine des spécificités et des enjeux des disciplines scientifiques concernées par ces corpus. Les HN sont un outil transdisciplinaire qui doit créer de nouvelles connaissances dans chaque discipline et en faciliter la diffusion, l'analyse et l'archivage numériques. Les changements et les enjeux sont importants : épistémologique, anthropologique, cognitif, sociologique.

En particulier dans les sciences littéraires et de l'érudition, l'évolution vers le numérique des sources de la recherche demande une technicité de plus en plus experte. Les corpus devien-

nent très massifs et pour certains nativement numériques. De nombreuses propositions sont faites pour éditer numériquement ces corpus et souvent uniquement pour leur intérêt patrimonial. Mais on constate qu'il y a beaucoup de discours et peu de corpus réellement disponibles pour différentes communautés de recherche. L'enjeu des prochaines années sera la mise à disposition de ces corpus étendus dans une optique FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable), initiative soutenue par de nombreux organismes publics. Il faudra alors pouvoir accompagner les futurs utilisateurs pour les aider à gérer et à exploiter les grandes masses de données numériques enfin disponibles.

Cela se traduit déjà par un nombre important de formations proposées (*in situ* ou en ligne, exploratoires ou approfondies) pour l'apprentissage d'outils, et par le nombre croissant de documents proposant des « recommandations » (ou « bonnes pratiques ») en matière de collecte, de traitement, de gestion, de publication, de valorisation des données et des résultats de la recherche. Les HN continuent d'être marquées par une multiplicité d'initiatives, de formats, de normes et de standards répondant à des objectifs spécifiques. Une certaine maturité et un état de l'art stable sont néanmoins décelables depuis quelques années autour de notions fédératrices comme l'archivage, l'interopérabilité ou le web sémantique ; la préoccupation de la pérennité de l'accès numérique à ces sources est ainsi devenue un préalable à tout projet avec des HN. Cela est d'autant plus important pour les disciplines recouvertes par la section 35 que le numérique devient la solution privilégiée – dans certains cas la seule – pour accéder aux sources et les exploiter.

Conclusion

Parvenus au terme de ce parcours – à la fois état des lieux et réflexion prospective – plusieurs conclusions sont possibles. Paradoxalement,

la diversité des pratiques scientifiques dans les divers domaines frayés par la Section – philosophie, textes et philologie, musicologie, arts et esthétique – fait apparaître des systèmes d'échos, une sorte de tissage en devenant avec un point de fuite, une unité focale : à bien des égards, tous les chercheurs de la Section 35 constituent et interrogent des *corpus* de textes, d'énoncés, de documents, de propositions épistémiques, qu'ils questionnent de façon critique, en pratiquant une réflexivité méthodologique. La construction de problématiques questionnant ces *corpus* est une pratique commune, qui décrit une forme d'*érudition* – en une extension du sens de ce mot –, et qui relève à bien des égards de l'activité d'*interprétation*. Les porosités fécondes avec d'autres sections (par exemple : 32, 33, 38) s'expliquent ainsi.

La réflexion engagée en fin de mandature sur les mots-clés s'est attachée à transcrire cet état des lieux et à en souligner la cohérence.

Observations générales et présentation des Annexes

La préparation du présent Rapport et l'expérience des évaluations des Unités fait apparaître une remarquable stabilité – en termes d'Unités de recherche – du périmètre de la Section 35, qui a par ailleurs entièrement refondu la liste des mots-clés destinés à baliser ce périmètre pour la prochaine mandature à partir de l'automne 2021. De façon unanime, les membres de la Section manifestent leur attachement au maintien d'un financement récurrent des Unités qui reste à un niveau élevé et soit équilibré par rapport aux financements sur projets (ANR, ERC). Dans le même temps, il faut souligner les bons résultats des politiques menées par les LabEx depuis 2011, car ceux-ci ont été des facilitateurs de synergie, ils ont permis l'émergence de projets thématiquement neufs et pluridisciplinaires, et ont fait davantage travailler ensemble chercheurs et enseignants-chercheurs appartenant à des équi-

pes différentes. Inquiets, comme une grande partie de nos communautés, à l'égard des perspectives ouvertes par la Loi de Programmation de la Recherche (LPPR puis LPR), les chercheurs, enseignants-chercheurs et personnels d'appui à la recherche (IE et IR) sont d'une grande vigilance, et n'ont guère apprécié telle promotion maladroite d'un « darwinisme » appliqué à l'évaluation et au pilotage de la recherche. La diminution des postes mis au concours à partir de 2019 est aussi une source de souci grave, car le déséquilibre s'accroît entre le nombre important des dossiers de candidature aux concours de Chargés de recherche (plus de 200) et le nombre de postes mis au concours depuis le début de la mandature. À condition qu'ils soient en quantité raisonnable et suffisamment « ouverts », les coloriations de postes de Chargés de recherche ne suscitent pas d'interrogation majeure (voir ci-après l'Annexe II). La Section s'inquiète en revanche de la disparition de toute possibilité pour les professeurs du Second degré engagés dans la préparation d'un doctorat, ou dans une recherche post-doctorale, d'obtenir un détachement ou une mise en disponibilité auprès d'une Unité de recherche afin d'y poursuivre des travaux dans de bonnes conditions. Il serait juste et fructueux pour la recherche de ne pas oublier ces collègues du Secondaire qui font de grands efforts pour poursuivre leurs travaux tout en assumant des tâches d'enseignement dont nous savons tous que les conditions sont parfois rudes. Il serait urgent que le CNRS se saisisse à nouveau de ce dossier. Par comparaison – et c'est un motif de satisfaction – le système des délégations, permettant à des enseignants-chercheurs de l'Enseignement supérieur de rejoindre pour six mois ou un an une Unité de recherche, donne satisfaction, et la Section souligne la grande qualité des projets qui lui sont soumis chaque année. Enfin, la période actuelle est marquée par une profonde reconfiguration de l'ESR, avec l'émergence de nouvelles « Universités » de grande taille, appuyées sur les Idex. Les UMR impliquent fortement le CNRS dans ces configurations neuves qui, au moment de la rédaction de ce Rapport, sont encore dans une phase de devenir ou de consolidation. Le CNRS est, essentiellement à travers ses UMR, un partenaire et un acteur de cette reconfiguration. Cela

pose la question des interlocuteurs pour les futures contractualisations (au niveau des établissements-composantes ou des « Universités » englobantes?), cela pose aussi la question des UMR qui sont à cheval, par exemple, sur deux « Universités » (comme PSL et Sorbonne Université), et l'articulation entre la politique scientifique des UMR et celle des « Universités » demandera réflexion. Cette dynamique de l'ESR suscite des sentiments divers dans nos communautés, entre adhésion et craintes (interrogations quant à la complexité de structures génératrices de conflits, dont le caractère démocratique est interrogé, ou encore sur la difficulté de faire émerger une politique scientifique claire et cohérente), et dans la phase présente l'on observe encore un certain déficit du sentiment d'« appartenance » des chercheurs à ces méga-structures. À rebours, les politiques d'appels d'offres menées dans les nouvelles « Universités » offrent déjà des occasions intéressantes pour le financement de projets originaux, et l'expérience, globalement positive, des LabEx, rend confiants certains membres de nos communautés.

*
* *

Les six annexes illustrent et complètent le Rapport, et mettent en évidence des axes forts de la réflexion de la Section : sur la politique de coloriage des postes de CR, la parité, l'usage du français dans l'expression scientifique, le développement du numérique et la production de bases de données et de revues.

Annexe I. Une liste complète (avec leurs sigles) des **Unités et structures de recherche** mentionnées dans le Rapport, au-delà même du strict périmètre des équipes de la Section 35.

Annexe II. Point sur les **coloriages** des postes de Chargés de recherche (2015-2019).

Annexe III. Point sur la politique menée en termes de **parité**.

Annexe IV. Sur l'usage du **français** dans la communication scientifique.

Annexes V et VI. **Bases de données et revues**.

Annexe I - Sigles

Liste des unités de recherche mentionnées dans le rapport, et des sigles

ACTE (Institut) : EA 7539 (U. Paris I Panthéon-Sorbonne)	CESR : Centre d'études supérieures de la Renaissance, UMR 6576 (Tours)
Amérique Latine : USR 3337	COMOD : LabEx Constitution de la modernité
AnHiMA : Anthropologie et histoire des mondes antiques, UMR 8210	CRAL : Centre de recherches sur les arts et le langage, UMR 8566
Archives Henri-Poincaré – PReST, UMR 7117	CRESPPA : Centre de recherches sociologiques et politiques de Paris, UMR 7217
Association francophone d'informatique musicale	Collegium Musicae : Institut de Sorbonne Université
CAPHÉS : Centre d'Archives en Philosophie, Histoire et Édition des Sciences – UMS 3610	CURAPP : Centre universitaire de recherches sur l'action publique et le politique, UMR 7319
CEFAS : Centre français d'archéologie et de sciences sociales, USR 3141	Réseau EUNoC (<i>European Non-Categorical Thinking</i>)
CEMS : Centre d'étude des mouvements sociaux (EHESS-CNRS, FRE 2023/INSERM U1276)	Eur'Orbem : Cultures et sociétés d'Europe orientale, balkanique et médiane, UMR 8224
Centre Alexandre Koyré : UMR 8560	<i>European Epistemology Network</i> (EEN)
Centre Atlantique de Philosophie : EA 7463 (U. de Nantes)	<i>European Training Network</i> (ETN)
Centre franco-chinois (CFC) de recherche en sciences sociales	GREAM : Groupe de recherches expérimentales sur l'acte musical (Strasbourg)
Centre Franco-Russe de Moscou, USR 3060	HASTECH : LabEx Histoire et Anthropologie des Savoirs, des Techniques et des Croyances
Centre François Viète, EA 1161 (Nantes-Brest)	IDEMEC : Institut d'ethnologie méditerranéenne, européenne et comparative, UMR 7307
Centre Gilles-Gaston-Granger, UMR 7304	IFEA : Institut français d'études anatoliennes, USR 3131
Centre Jean Pépin, UMR 8230	IHPST : Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques, UMR 8590
Centre Léon Robin, UMR 8061	IHRIM : Institut d'histoire des représentations et des idées dans les modernités, UMR 5317
Centre Marc Bloch, USR 3130	
Centre Paul Albert Février (CPAF), UMR 7297	
CESCM : Centre d'études supérieures de civilisation médiévale, UMR 7302 (Poitiers)	

- IJN : Institut Jean Nicod, UMR 8129
- IMS : International Musicological Society
- Institut d'études augustiniennes : composante du LEM, UMR 8584
- Institut de mathématiques de Toulouse (UMR 5219)
- Institut des Sources Chrétiennes : composante du laboratoire HiSoMA (Histoire et Sources des Mondes Antiques)
- Institut français de Pondichéry, USR 3330
- Institut français de recherche sur le Japon à la Maison franco-japonaise, Umifre 19, MEAE-CNRS
- International Association for the Study of Popular Music, branche franco-phonie d'Europe
- International Musicological Society (IMS)
- IreMus : Institut de recherche en musicologie, UMR 8223
- IRHT : Institut de recherche et d'histoire des textes, UPR 841
- ISJPS : Institut des sciences juridique et philosophique de la Sorbonne, UMR 8103
- ITEM : Institut des textes et manuscrits modernes, UMR 8132
- LEGS : Laboratoire d'études de genre et de sexualité, UMR 8238
- LEM : Laboratoire d'études sur les monothéismes, UMR 8584
- LIER : Laboratoire interdisciplinaire d'études sur les réflexivités (-Fonds Yan Thomas), FRE 2024
- Maison Française d'Oxford, USR 3129
- OBVIL : LabEx Observatoire de la vie littéraire
- Pays germaniques (Archives Husserl – Transferts culturels) : UMR 8547
- PHIER : Philosophies et rationalités, EA 3297 (Clermont-Ferrand)
- Philosophie, pratiques et langages : EA 3699 (U. Grenoble Alpes)
- équipe PLC, Grenoble
- PRISM : Perception Représentations Image Son Musique, UMR 7061
- réseau sur la philosophie de la mémoire
- Réseau de philosophie des sciences biologiques et médicales de Bordeaux
- réseau *Philosophy of Language and Mind* (PLM)
- PRISM : Perception Représentations Image Son Musique, UMR 7061
- SND : Sciences, Normes, Décisions, FRE 3593
- Société française d'analyse musicale
- Société française d'ethnomusicologie
- Société française de musicologie
- SPHERE : Sciences, philosophie, histoire, UMR 7219
- STL : Savoirs, Textes, Langages, UMR 8163
- STMS-IRCAM : Sciences et technologies de la musique et du son – Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique, UMR 9912
- SYRTE : Systèmes de Référence Temps-Espace, UMR 8630
- THALIM : Théorie et histoire des arts et des littératures de la modernité, UMR 7172
- Triangle : *Action, discours, pensée politique et économique*, UMR 5206

Annexe II - Relative aux coloriations (2015-2019)

Nous présentons dans cette Annexe une synthèse des coloriations publiées lors des derniers concours CR (années 2015-2019), et une évaluation partielle des recrutements et affectations.

Année 2015 :

– concours CR2, 2 thèmes prioritaires : « Pratiques artistiques contemporaines » et « musicologie » ;

– concours CR1, un thème prioritaire : « La notion de handicap : approches épistémologiques, politiques et éthiques, histoire et représentations ».

Année 2016 :

– concours CR2, 2 thèmes prioritaires : « Mondes anglophones » et « Textualités religieuses » ;

– concours CR1, un thème prioritaire : « Pratiques contemporaines, normativités et pensée politique ».

Année 2017 :

– concours CR1, 2 thèmes prioritaires : « Questions environnementales » et « Modélisation et quantification en philosophie et humanités ».

Année 2018 :

– concours CRCN, 3 thèmes prioritaires : « Éducation, transmission, formation », « Hybridités : langues, cultures, identités », et « Arts visuels, arts sonores, écritures : théories et performances ».

Année 2019 :

– concours CRCN, 2 thèmes prioritaires : « Écritures, théories et mémoires de l'exil » et « Expérience et pensée de la santé et de la maladie ».

Si certains coloriations n'ont pu être pourvus (comme « mondes anglophones » [2016], ou encore « Expérience et pensée de la santé et de la maladie » [2019]), si tel d'entre eux s'est révélé trop large (« musicologie » [2015]), s'il est arrivé malheureusement qu'un candidat recruté sur le

coloriage « Modélisation et quantification en philosophie et humanités » [2017] choisisse de quitter son poste de Chargé de recherche au CNRS pour un poste à l'étranger, la Section est dans l'ensemble parvenue à évaluer les candidatures en pleine cohérence avec celles qui correspondaient aux postes non coloriés, sans risquer un déséquilibre qui aurait nui à l'équité de traitement. La définition assez vaste des coloriations par la direction de l'Institut SHS a été appréciée, car elle a laissé à la Section une marge d'interprétation favorisant la recherche de profils originaux dont l'excellence pouvait être comparée à celle des autres candidats. Certains domaines ont pu ainsi bénéficier de cette politique des coloriations. C'est le cas par exemple de la musicologie, avec le recrutement en 2018, sur le coloriage « Arts visuels, arts sonores, écritures : théories et performances », d'un chercheur qui se présentait avec un projet intitulé « Système et Idées : évolution du langage musical et mutation des savoirs durant les Temps modernes », et qui a été affecté à l'IreMus. C'est aussi le cas de la littérature : en 2019 a été recruté, sur le coloriage « Écritures, théories et mémoires de l'exil », un CRCN qui présentait un projet intitulé « Les écrivains maghrébins exilés entre langues et territoires. Une histoire littéraire du temps présent », et qui a été affecté à l'UMR THALIM.

La section dispose d'un certain recul pour apprécier le succès de la politique de coloriage, comme le montrent les exemples suivants, remarquables par leur variété.

En 2015, le coloriage « La notion de handicap » a conduit à un recrutement particulièrement fructueux en philosophie en ce qu'il permet de faire le lien entre l'histoire des idées (notamment sur les questions de cécité et de perception du XVIII^e au XX^e siècle), et des interventions qui s'appuient sur ce savoir mais qui prennent place dans la société civile, qu'il s'agisse d'un enseignement à l'Institut d'éducation sensorielle de Lyon, d'ateliers mensuels réunissant personnes aveugles et personnes non aveugles s'attachant à rédiger des descriptions

littéraires de plusieurs peintures aborigènes du musée du Quai Branly à Paris, d'ateliers organisés auprès du personnel de l'établissement (dédié aux enfants aveugles porteurs de troubles associés). Ce recrutement a également permis de mener le projet TETMOST (La peinture au prisme de la cécité. Parcours muséal et accessibilité audio-tactile) dans le cadre du « Défi AUTON de la Mission pour l'interdisciplinarité du CNRS » qui a coordonné sept institutions. Ce coloriage est donc une pleine réussite.

Le coloriage « Textualités religieuses », publié en **2016**, a permis le recrutement d'un très jeune chercheur helléniste spécialisé dans le domaine de l'Antiquité tardive (Jamblique), qui a accentué l'ouverture thématique d'une UMR traditionnelle focalisée sur la philosophie grecque classique (le Centre Léon Robin), en direction des études néoplatoniciennes. Ses recherches se sont développées autour des philosophies religieuses de l'Antiquité tardive (néoplatonisme, mais aussi philosophie chrétienne et théorie des mythes), avec divers travaux sur Saloustios, Jamblique et Hiéroclès d'Alexandrie, qui illustrent au plus haut niveau une histoire de la philosophie soigneusement articulée à la philologie, aux études anciennes et à la contextualisation historique.

Le profil « Pratiques contemporaines, normativités et pensée politique », mis au concours en **2016**, a permis un recrutement dans un domaine très important pour la philosophie française depuis les travaux de Michel Foucault, mais étrangement minoritaire parmi les candidats au

concours, et peu représenté parmi les chercheurs de la section 35 : l'histoire conceptuelle et politique des pratiques sexuelles. Le programme mis en place par la chercheuse recrutée, qui porte sur l'analyse de la « démocratie sexuelle » contemporaine, de ses normes et de ses limites à travers l'histoire des sciences médicales, des sciences psychologiques et des sciences humaines et sociales, est une pièce essentielle dans la généalogie du sujet contemporain. La participation à une soumission de projet ERC et la préparation (en cours) d'un projet ANR consacré à ces thématiques montrent l'effet structurant que ce recrutement a eu pour les études de genre au sein de la section 35.

Le coloriage « Questions environnementales » proposé au concours **2017** a permis le recrutement d'un tout jeune chercheur en histoire et philosophie des géosciences. Le programme ambitieux qu'il a mis en place depuis deux ans vient combler un manque important dans l'histoire et la philosophie des sciences contemporaines, puisque les sciences de l'environnement ou sciences du système-Terre n'ont pas fait l'objet d'études comparables aux sciences mathématiques, physiques et aux sciences de la vie, qui restent très dominantes dans les profils de philosophes et historiens des sciences au concours. On peut souligner que ce recrutement s'est fait dans un vivier de candidats très restreint, peu de docteurs étant alors formés dans cette spécialité émergente, mais celle-ci se structure rapidement, grâce notamment à l'existence d'un concours spécifique en section 52.

Annexe III - Rapport sur la parité (années 2017-2019 et prospective)

La présente commission 35 siège désormais depuis trois ans. Ces trois années ont permis à la commission de se sensibiliser à la question de la parité et de mettre en place des mécanismes de contrôle des équilibres à la sélection comme à la pré-sélection des dossiers. Ce rapport se concentre sur la parité au concours CR. Pour le concours DR le comité a classé de façon équilibrée au fil des ans. Pour le concours CR les débuts de la commission ont été plus tumultueux.

1. Période 2017-2019

- En 2017, un déséquilibre de genre s'est en effet d'abord produit sur le concours CR. Cette année-là la distinction CR1-CR2 existait encore pour la dernière année (ce que le comité ignorait alors). Sur 223 candidats, il y avait 105 femmes (47%) et 117 hommes (53%). Or sur 66 personnes auditionnées (29% de l'effectif de départ), la commission avait classé, au terme des délibérations, 4 candidats au concours CR2 (35/03), 2 hommes en liste principale, et 2 femmes en liste complémentaire, et 5 candidats au concours CR1 (35/02), parmi lesquels 3 hommes en liste principale et 1 femme et 1 homme en liste complémentaire. De fait, 5 hommes se sont trouvés sur liste principale pour 5 postes CR, et les candidates admissibles l'ont été uniquement sur liste complémentaire. Cette situation n'a pas manqué d'alerter la commission. Une analyse post-hoc a révélé que la commission avait pré-sélectionné les 66 dossiers indistinctement, c'est-à-dire sans se soucier de la distinction CR1-CR2, alors que cette distinction a de fait conduit plus d'hommes que de femmes à se présenter sur les deux concours. Alors que les dossiers admis à poursuivre étaient à peu près équilibrés entre hommes et femmes pour les deux postes CR2, pour les trois postes CR1 le comité a admis à poursuivre, sans s'en rendre compte, 27 hommes contre 4 femmes! Ce déséquilibre considérable a nui à la parité. Il a fait

l'objet d'un rapport interne détaillé et transmis à l'époque à l'INSHS. De plus, alors que la commission avait voté place par place sans se soucier du genre, il a été résolu pour les années suivantes d'être beaucoup plus vigilant à toutes les étapes pour éviter tout biais de sélection de même nature.

- Par la suite, en 2018, l'abrogation de la distinction CR1-CR2 a effacé une partie du phénomène d'autocensure féminine mesuré en 2017. En 2018 nous avons reçu 237 candidatures au concours CRN, dont 121 femmes (51%) et 116 hommes (49%).

- En 2019, 229 candidats à un poste de CRCN ont été admis à concourir, dont 134 femmes (58.5%) et 95 hommes (41.5%). À l'issue des JAD, 56 candidats ont été admis à poursuivre, dont 29 femmes (51.7%) et 27 hommes (48.3%). Cette année-là la commission a classé en liste principale 5 femmes et 1 homme, et en liste complémentaire 4 hommes. Si l'on rapporte le tirage de 5 F et 1 H à distribution initiale globale (134 F, 95 H), alors la probabilité d'obtenir au moins 5 femmes sur 6 tirages au hasard est de 0.207, soit une chance sur cinq, ce qui n'indique pas de biais significatif. Si on rapporte ce tirage à la distribution (29 F, 27 H) obtenue après les JAD (56 auditionnés, 24.5% de l'effectif de départ), la probabilité est de 0.11, soit une chance sur neuf, ce qui n'est pas négligeable, sans non plus être significatif (pour le seuil conventionnel de 0.05).

2. Bilan et prospective

La commission note que si le concours 2017 a plutôt favorisé les candidatures masculines, le concours 2018 a été équilibré, alors que le concours 2019 a plutôt favorisé les candidatures féminines. Au total, malgré les fluctuations, le

bilan des sélections s'est donc équilibré. Indépendamment du genre, il est à noter que le nombre total des candidatures est resté à peu près stable sur la période, mais que la pré-sélection s'est renforcée peu à peu au fil des ans. Cette tendance est

certainement vouée à se renforcer, le comité étant soucieux d'affiner sa sélection en amont des auditions, pour des auditions bénéficiant d'une meilleure écoute sur une semaine moins chargée.

Annexe IV - Collections et ressources⁽⁴⁾, le français et le multilinguisme

UMR5186	IRCL	Institut de recherche sur la Renaissance, l'Age Classique et les Lumières	VIENNE-GUERRIN Nathalie		<p>Éditions : Œuvres complètes de D'Alembert, Œuvres complètes de Diderot</p> <p>Corpus numériques : Jean Potocki (site internet https://www.jean-potocki.com/ et collection HAL https://hal.archives-ouvertes.fr/POTOCKI), Collection Hal «New Faces» https://halshs.archives-ouvertes.fr/NEW-FACES</p>
UMR5206		TRIANGLE : ACTION, DISCOURS, PENSÉE POLITIQUE ET ECONOMIQUE	VERJUS Anne		<p>Éditions critiques</p> <p>Al-Māwardī Bakounine Botero Dupuit Foucault Galiani Machiavel Polanyi Say Seyès Walras</p> <p>Presse ouvrière lyonnaise du XIX^e siècle</p> <p>Corpus numériques</p> <p>La Bibliothèque Foucauldienne Œuvres complètes de Mussolini Storia d'Italia : Edition numérique de l'Exorde de la <i>Storia d'Italia</i> de Francesco Guicciardini Hyper Prince L'écho de la Fabrique Boris N. Tchitcherine Projet Mosare Publications et travaux de l'IEEO Le roman des Morand</p>
UMR5316		Litt&Arts	GOYET Francis		<p>Collections : « Archives critiques », « Ateliers de l'imaginaire », « Bibliothèque stendhalienne et romantique », « Des princes », « Didaskéin », « La fabrique de l'œuvre », « Iconographie en débat », « Janoub », « Vers l'Orient », « Moyen Âge européen », « Le chant des possibles »</p>
UMR5317	IHRIM	Institut d'Histoire des Représentations et des Idées dans les Modernités	BARA Olivier		<p>Collections : « Théâtre et société »</p> <p>« Des deux sexes et autres »</p> <p>« Le XIX^e siècle en représentation(s) », « Louise Michel », « Problèmes de raison », « Sodome et Gomorrhe », « Cahiers Masculin/Féminin », « Théologie historique », « Clés concours agrégation Lettres XIX^e siècle », « Dialogues des Modernités », « Sources classiques », « Lumière classique », « Renaissance et âge classique », « Textes de philosophie », « L'actualité des Classiques », « Collection du CERHAC », « Essais », « Études spinozistes », « La Vie des Huguenots », « La cité des dames », « Lettres, idées, arts (XVI^e-XVII^e siècle) », « Lire le XVIII^e siècle », « L'école du genre », « Philosophies »</p> <p>Corpus et éditions numériques : « Anciens et Modernes : édition du <i>Parallèle des Anciens et des Modernes</i> de Charles Perrault », « Digital Matteo Ricci », « Charles Fontaine », « Essentiels Descartes », « Le Gazetier révolutionnaire », « Le Gazetier universel », « Les gazettes européennes du XVIII^e siècle », « Les journaux d'Alexandre Dumas »;</p>

					<p>« Les dossiers de Bouvard et Pécuchet », « L'édition électronique des <i>Pensées</i> de Blaise Pascal », « L'epistolario de Paolo Sarpi, édition critique », « Mondes humanistes et classiques », « Montesquieu : bibliothèque et éditions », « Skepsis. Autour du scepticisme », « Poèmes satiriques du XVIII^e siècle »</p>
UMR7117	LHSP-AHP	Laboratoire d'Histoire des Sciences et de Philosophie – Archives Henri Poincaré	NABONNAND Philippe		<p>Fonds d'archives (accessibles via le site de l'UMR) : « La correspondance d'Henri Poincaré », « Henri Poincaré : du mathématicien au philosophe », « Archives Bourbaki : sources pour l'histoire », « Nouvelles Annales des mathématiques », « Histoire des Institutions scientifiques et éducatives de Nancy », « Archives de la Faculté des sciences de Nancy », « Archives e-LV : Archives de l'École Lvov-Varsovie »</p>
UMR7172	THALIM	Théorie et histoire des arts et des littératures de la modernité	SCHAFFNER Alain		<p>Revue d'histoire du cinéma AG. Cahiers Armand Gatti Apollinaire Cahiers Raymond Queneau Commonwealth Essays and Studies International Review on Sport & Violence Les Amis de Valentin Brû Les Cahiers du Ceracc Les Cahiers du CEEI Le nouveau recueil OutreScène</p> <p>Édition numérique Arcs (Archive : Claude Simon et ses contemporains) Bibliothèque numérique LIVRESC Collectif « Penser d'ailleurs » Édition numérique de Femmes Une édition numérique des manuscrits de Claude Simon conservés à la Bibliothèque littéraire Jacques Doucet ELLAF : La bibliothèque numérique des littératures en langues africaines IDEM. Identification, empathie, projection dans les arts du spectacle Carnet de recherche Les Poètes et la publicité Carnet de recherche POLAR Claude Simon Vers une géographie littéraire ZoneZadir</p> <p>Collections « Archives » « Arts du spectacle » Série « Spectacles, histoires, société » et série « Les voies de la création théâtrale » « Bibliothèque des correspondances, mémoires et journaux » « Clefs concours Littérature française xx^e siècle » « Ecrivains d'aujourd'hui » « Fiction/Non fiction XXI » « Francophonies » « Ideal &Real » « L'Esprit des lettres » « Littérature de notre siècle » « Mettre en scène » « René Char » « Textes de littérature moderne et contemporaine » « TH 20 » « Tohu-bohu » « Images et sons »</p>

UMR7217	CRESPPA	Centre de Recherches Sociologiques et Politiques de Paris – CRESPPA	CADOT Christine		Collection : « Ouvertures politiques »
UMR7219	SPHERE	Sciences – Philosophie – Histoire	ROMMEVAUX-TANI Sabine	arabe	Collection : « A history of Arabic Sciences and Mathematics » Éditions de textes : Eutocius d'Ascalon. Commentaire sur le traité des « Coniques » d'Apollonius de Perge (Livres I-IV) ; Les « Arithmétiques » de Diophante. Lecture historique et mathématique ; Abū Kāmil : Algèbre et analyse diophantienne ; Apollonius de Perge. La section des droites selon des rapports ; Apollonius de Perge. Coniques ; Al-Khwarizmi. Le commencement de l'algèbre ; Le Développement de la géométrie aux IX ^e -XII ^e siècle. Abu Sahl Al-Quhi ; Al-Khayam Umar. Al-Khayam mathématicien ; Averroès. Commentaire moyen à la Rhétorique d'Aristote ; Œuvres de Pierre Fermat ; Thabit ibn Qurra. Science and Philosophy in Ninth-Century Baghdad ; Œuvres philosophiques et scientifiques d'al-Kindi ; Les Catoptriciens grecs ; Buffon : œuvres complètes ; Oken, La Génération (1805) (traduit de l'allemand, introduit et annoté)
UMR7302	CESM	Centre d'études supérieures de civilisation médiévale	AURELL Martin	latin, grec	ARMMA : ARMorial Monumental du Moyen Âge Collection HAL-SHS du CESC M ; Collections (aux éditions BREPOL S) : « Culture & société médiévales », « Histoires de famille. La parenté au Moyen Âge », « Bibliothèque de Transmédié (BITAM) », « Textes vernaculaires du Moyen Âge » Corpus des inscriptions de la France médiévale Revues Annales de Janua In-Scriptio PRIS-MA
UMR7319	CURAPP-ESS	Centre universitaire de recherches sur l'action publique et le politique. Epistémologie et Sciences sociales	LE BOUTEILLEC Nathalie		Collection « Paradoxa ».
UMR7323	CESR	Centre d'études supérieures de la Renaissance	PIERRE Benoist	latin, grec, italien, espagnol	Collections « Études Renaissance » « Épitome musical » « Europa Humanistica » « Le Savoir de Mantice » Catalogues régionaux des incunables « Christophe Plantin » « Travaux du Centre d'études supérieures de la Renaissance » « Musicologie » « Renaissance » « Scène européenne – Traductions introuvable » Publications électroniques Scène européenne Base Florio Hasard et Providence XIV ^e -XVII ^e siècles Le Journal de la Renaissance

UMR8061		Centre Léon Robin de recherche sur la pensée antique	GOURINAT Jean-Baptiste	latin, grec	Éditions : « Boéthos de Sidon, exégète d'Aristote et philosophe » ; « Clémence Ramnoux, Œuvres » ; « Hiéroclès d'Alexandrie, Commentaire sur les Vers d'or des Pythagoriciens suivi de Traité sur la Providence » ; « Plotin, Traité 20, Qu'est-ce que la dialectique ? » ; « Aristophane, Les Thesmophories ou La Fête des femmes » Série : « Aristote, Métaphysique », parus : Aristote, Métaphysique Epsilon, Aristote, Métaphysique Eta, Aristote, Métaphysique Delta ; « Commentary on Aristotle De Generatione et corruptione » ; « Alexandre d'Aphrodise, commentaire perdu à la Physique d'Aristote »
UMR8129	IJN	Institut Jean-Nicod	CASATI Roberto		Collections : « Jean-Nicod Series », « Context and Content »
UMR8132	ITEM	Institut des Textes et Manuscrits Modernes	D'ORIO Paolo	italien, espagnol	Reuves Etudes sartriennes Continents Manuscrits Escritural – Écritures d'Amérique latine El bestiario de la literatura latinoamericana (El bestiario transatlantico) Planète libre Éditions des archives contemporaines Collections « Multilinguisme, traduction, création », « Studia Nietzscheana »
UMR8163	STL	Savoirs, textes, langage	WEBB Ruth		Recueil en ligne : Silexicales / Repères en morphologie Collections « LOGIC, EPISTEMOLOGY AND THE UNITY OF SCIENCE (LEUS) », « Logic, Argumentation and Reasoning. Interdisciplinary approaches from the Humanities and Social Sciences »
UMR8209	CESSP	Centre Européen de Sociologie et de Science Politique de la Sorbonne	BRIQUET Jean Louis		Working Papers CESSP Working Papers TEPISIS
UMR8223	IReMus	Institut de recherche en Musicologie	DAVY-RIGAUX Cécile	allemand, grec ancien et byzantin, latin, arabe, hébreu	Reuves CAHIERS DE L'OMF MUSICOLOGIES Collections SCIENCES DE LA MUSIQUE ŒUVRES COMPLÈTES DE CLAUDE DEBUSSY ŒUVRES COMPLÈTES DE FAURÉ EDITIONS OMF (OBSERVATOIRE MUSICAL FRANÇAIS) EGLISE, LITURGIE ET SOCIÉTÉ DANS L'EUROPE MODERNE JEAN-PHILIPPE RAMEAU, OPERA OMNIA (OOR) MUSIQUES POPULAIRES ACTUELLES / AMPLIFIÉES ŒUVRES INSTRUMENTALES COMPLÈTES DE CAMILLE SAINT-SAËNS (OIC) Collections : « Eur'Orbem éditions », « Études et travaux », « Série Cultures d'Europe Centrale »
UMR8224	EUR'ORB-EM	Europe orientale, balkanique et médiane	GALMICHE Xavier	langues slaves	Publication numérique : « Change numérique : Édition intégrale de la revue Change (1968-1983) »

UMR8230	CJP	Centre Jean Pépin	CAYE Pierre	ital., arabe, latin, grec, araméen	<p>Collections</p> <ul style="list-style-type: none"> « CHRYSOPEIA » « Textes et traditions » « Histoire des doctrines de l'antiquité classique » « Les écrits de Plotin » <p>Dictionnaire des philosophes antiques</p>
UMR8546	AOROC	Archéologie et philologie d'Orient et d'Occident	GODDARD Christophe	turc, arabe, grec, latin, langues italiques et pré-comaines	<p>Revues</p> <ul style="list-style-type: none"> Études celtiques Bulletin de l'AIEMA Histara, les comptes rendus <p>Collections</p> <ul style="list-style-type: none"> « Histoire et archéologie ». « Archeologia-Nuova Serie ». « Etudes de littérature ancienne ». « Pictor » « Afrique ». « Asie Centrale ». « Asie mineure ». « Moyen Orient ». « Italie ». « Construction et décor ». « Méthodes et prospections ». « Numismatique ». « Protohistoire ». « Sources, textes et épigraphie ».
UMR8547		Pays germaniques (Histoire, Culture, Philosophie) – Transferts Culturels / Archives Husserl de Paris	KALINOWSKI Isabelle	allemand, grec moderne	<p>Collections : « Bibliothèque franco-allemande », « De l'Allemagne », « Deutsch-französische Kulturbibliothek », « Épiméthée », « Perspectives Germaniques », « Bibliothèque d'histoire de la philosophie », « Bibliothèque de textes philosophiques », « Philosophica », « Problèmes et controverses »</p>
UMR8557	CAMS	Centre d'analyses et de mathématiques sociales	NADAL Jean-Pierre		<p>Revues</p> <ul style="list-style-type: none"> European Journal of Combinatorics Mathematical Population Studies <p>Archives</p> <ul style="list-style-type: none"> Mathématiques et Sciences humaines ~ Mathematics and Social Sciences JEPHS (Journal Electronique d'Histoire des Probabilités et de la Statistique / Electronic Journal for History of Probability and Statistics)
UMR8558	CRH	Centre de recherches historiques	LE ROUX Thomas		<p>Revues</p> <ul style="list-style-type: none"> L'Atelier du CRH, revue électronique La Bibliothèque du CRH (2011-2013) Les Cahiers du CRH (1988-2010) <p>Revues associées</p> <ul style="list-style-type: none"> Oliviana Les dossiers du Grihl <p>Revues liées au CRH</p> <ul style="list-style-type: none"> Entreprises et histoire Genèses Histoire et mesure
UMR8560	CAK	Centre Alexandre Koyre	MANDRESSI Rafael		<p>Revues : Artefact, Revue d'histoire des sciences humaines</p>

UMR8566	CRAL	Centre de recherche sur les arts et le langage	BRETON Stéphane	espagnol, portugais	Collections : « Arts », « Arts et Photographie », « Bibliothèque italienne », « L'Ymagier », « Narratologica », « Terrains et théories anthropologiques »
UMR8584	LEM	Laboratoire d'Études sur les Monothéismes	DE FRANCESCHI Sylvio Hermann	latin, grec, hébreu	Projets numériques : « Nouvelle Gallia-Germania Judaica », « Mapping Spinoza's Ethics », « Le portail Web des Ressources numériques LEM-CERCOR »
UMR8599	CELLF	Centre d'étude de la langue et des littératures françaises	MARTIN Christophe		<p>Carnets et sites associés</p> <p>Bibliothèque Dramatique http://bibdramatique.huma-num.fr/ Cornucopia http://cornucopia16.com Corpus électronique de la première modernité http://www.cepm.paris-sorbonne.fr/ eBalzac https://ebalzac.com/ Idées du Théâtre http://idt.huma-num.fr/ Inventaire des manuscrits philosophiques clandestins (IMPC) http://www.bibliotheque-mazarine.fr/fr/impc Le grand Cyrus http://www.artamene.org/ Le Règne d'Astrée http://astree.huma-num.fr/ Les Nouvelles Nouvelles (Donneau de Visé) http://www.nouvellesnouvelles.fr/ Molière 21 http://moliere.huma-num.fr/ Molière Corneille http://moliere-corneille.huma-num.fr/ Naissance de la critique dramatique http://www.ncd17.fr Observatoire de la vie littéraire (Labex Obvil) http://obvil.paris-sorbonne.fr/ Répertoire du théâtre imprimé http://www.repertoiretheatreimprime.fr</p> <p>les sites partenaires</p> <p>Consortium Cahier http://www.cahier.paris-sorbonne.fr/ Fabula http://www.fabula.org/ Item – Institut des textes et manuscrits modernes http://www.item.ens.fr/index.php?id=115642 Lettres de Juliette Drouet http://www.juliettedrouet.org/lettres/#.U7EH2BY-Nss PRITEPS http://theatrestudies.hypotheses.org</p>
UMR8630	SYRTE	Systèmes de référence temps-espace	LANDRAGIN Arnaud		« Collection ALFA » (Brepols), Collection WSAWM « Why Sciences of the Ancient World Matters? »
UMS3610	CAPHÉS	Centre d'archives en philosophie, histoire et édition des sciences	GIREL Mathias		<p>Collections</p> <p>Collection L'Évolution de l'humanité Collection Bibliothèque de l'Évolution de l'humanité Édition des Œuvres complètes de Georges Canguilhem Collaboration au projet d'édition numérique « Dans l'atelier de La Nouvelle Héloïse »</p>

					Collaboration au projet « Foucault Fiches de Lecture » (2017-2020)
UPR841	IRHT	Institut de recherche et d'histoire des textes	BOUGARD Francois	latin, langues romanes, hébreu, grec, copte, syriaque, arabe	<p>Ressources et Collections</p> <p>BVMM : bibliothèque virtuelle des manuscrits médiévaux Medium : répertoire des manuscrits reproduits ou recensés Bibale : collections anciennes et transmission des manuscrits médiévaux Biblia glossata Bibliissima CALD : Corpus of Arabic Legal documents Calendoscope : identification des calendriers liturgiques médiévaux Codicologia : vocabulaire multilingue pour la description des manuscrits Collecta : archive numérique de la collection Gaignières (1642-1715) Comparatio : chant liturgique médiéval Diktyon E-Ktope : manuscrits syriaques FAMA : Œuvres latines médiévales à succès Glossaria Glossaire du latin philosophique Graphoskop Ideal Index du CMD-F : catalogue des manuscrits datés Initiale : catalogue de manuscrits enluminés Islamic law materialized I-Stamboul Iter Liturgicum Italicum : répertoire des manuscrits liturgiques italiens Jonas : répertoire des textes et manuscrits médiévaux d'oc et d'oïl Libraria Manuscrits de Chartres Millesimo : chronologie médiévale Monumenta paleographia Medii Aevi Onomasticon Arabicum : prosopographie de l'islam médiéval Palaeographia Papyrologie Pierre Lorfèvre Pinakes : textes et manuscrits grecs RegeCart SourcEncyMe Sources d'histoire médiévale Telma Thesis Touat Tradlat</p> <p>Carnets de recherche</p> <p>Administrer par l'écrit Atelier Vincent de Beauvais De rebus diplomaticis Filigranes pour tous Gloses philosophiques à l'ère digitale Himanis Le monde des djinns Liber radicum, Sefer ha-shorashim</p>

					<p>Libraria Libri Sagienses Manuscrits en Méditerranée Oriflamms Ou grant livraire Sacra Pagina</p>
UAR3611 (ex UPS3611)	ISC-PIF	Institut des Systèmes Complexes de Paris Île-de- France	CHAVALARIAS David		App.Informatique Gargantext
USR3060		Centre d'études franco-russe de Moscou	MELAT Hélène	russe	« Carnets du CEFR », Collection « Histoire soviétique : éléments de discussion »
USR3131	IFEA	Institut français d'études anatoliennes – Georges Dumezil	BALCI Bayram	turc	Bibliothèque (électronique) de l'IFEA La Turquie aujourd'hui Patrimoines au présent IFEA/Kitap yayinevi Rencontres d'Istanbul Passé ottoman, présent turc Rencontres d'Archéologie de l'IFEA
USR3135	IFPO	Institut français du Proche- Orient	MOUTON Michel	arabe	Les Carnets de l'Ifpo Collections : « Collection Indologie », « Collection écologie », « Collection Sciences sociales », « Pndy Papers in Ecology », « Pndy Papers in Social Sciences », « Regards sur l'Asie du Sud. / South Asian Perspectives », « Steles : Jean Fillozat Series in South Asian Culture and History », « Working Papers Series »
USR3330		Savoirs et Mondes Indiens	RIPERT Blandine		Manuscrits shivaïtes de Pondichéry, Herbier de l'IFP, Portail de la Biodiversité en Inde,
USR3337		Amérique Latine	TALLET Bernard	espagnol	Collections : « Biblioteca Andina de Bolsillo », « Actes et mémoires »
USR3550		MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME DE CLERMONT FERRAND	LUIS Jean- Philippe		Ressources Fonds THEREPSICORE : théâtre sous la Révolution et l'Empire en Province. Fonds MUSEFREM : Musiciens d'Eglise en France à l'époque moderne. Fonds GRIMM : Réécritures, réception et intermédialité : les contes des frères Grimm : (1810-2016) La bibliothèque de corpus : Le fonds Bastaire (en cours d'installation à la MSH) Les fonds éditoriaux pour la jeunesse : fonds Ipomée, fonds Christian Bruel, fonds MeMo, fonds Les fourmis rouges, fonds d'albums EVE (enfance, violence, exil)
USR3566	MSHS Sud- Est	Maison des Sciences de l'Homme et de la Société Sud-Est	SCHEER Tobias		Cahiers de la Méditerranée Corpus Noesis ERIEP Cahiers de l'URMIS Le Français en Afrique
USR3608		République des savoirs : Lettres, Sciences, Philosophie	ROUX Sophie		Carnets de recherche : « Mathesis » et « 1914/1918 »

Annexe V - Tableau des bases de données produites dans le périmètre de la section 35

Nom de la base	Lien	Laboratoire	Description	Observations
Répertoire des sources philosophiques antiques	http://rspa.vjf.cnrs.fr/	UMR8230 Centre Jean-Pépin	sources primaires des Présocratiques au 6 ^e s. apr. J.-C.	contient documentation
Bibliographie platonicienne	http://platosociety.org/plato-bibliography/	UMR8230 Centre Jean-Pépin	bibliographie	en ligne 2000-2012, avant imprimée
IPHiS-CIRIS	https://iphi.hypotheses.org/	UMR8230 Centre Jean-Pépin	bibliographie des éditions de textes antiques	début février 2019
PAT (les platonismes dans l'Antiquité tardive)	http://philognose.org/	UMR8230 Centre Jean-Pépin	médio-et néoplatonisme, gnosticisme, hermétisme, oracles chaldaïques	avec le LEM (UMR8584) et le labex HASTEC
ABJAD	http://abjad.phic-project.org/	UMR8230 Centre Jean-Pépin	mss philo arabes & syriaques dans le monde islamique jusqu'au 19 ^e s.	documentation complète, accès sur inscription (pas pratique)
Catalogue des cartes et plans	http://www.ifea-istanbul.net/index.php/fr/cartes-et-plans	USR3131 IFEA Georges-Dumézil	listes en PDF : Istanbul/Turquie/Empire ottoman/Caucase	
Atlas d'Istanbul	http://www.ifea-istanbul.net/images/stories/carto/ATLAS2013/ATLAS/index2.html	USR3131 IFEA Georges-Dumézil	du 18 ^e s. à nos jours	divers cartes/plans consultables en ligne
Cartes utiles	http://www.ifea-istanbul.net/index.php/fr/cartes-utiles	USR3131 IFEA Georges-Dumézil	anciennes et modernes	consultables en ligne
IFP Manuscripts Database	http://www.ifpindia.org/digitaldb/online/manuscripts/	USR3330 IFP Mondes indiens	8500 mss shivaïtes sur feuille de palme	Patrimoine mondial UNESCO, collection unique au monde
Herbier Institut français de Pondichéry (HIFP)	http://ifp.plantnet-project.org/	USR3330 IFP Mondes indiens	24000 spécimens des Ghats occidentaux et de toute l'Inde	élargi au monde entier (dons/échanges)
Corpus de philosophie des mathématiques 1499-1701	http://www.sphere.univ-paris-diderot.fr/spip.php?rubrique129	UMR7219 SPHERE	présentation, textes, carte <i>Mathesis universalis</i>	carte « en construction »
Corpus des éd. renaissantes des <i>Éléments</i> d'Euclide 1482-1606	http://www.sphere.univ-paris-diderot.fr/spip.php?rubrique131	UMR7219 SPHERE	tableau chronologique, liens vers les textes numérisés	avec le Centre Koyré, le CESR, l'IREM de Limoges
Les bibliothèques virtuelles humanistes (BVH)	http://www.bvh.univ-tours.fr/	UMR7323 CESR	portail sur les documents patrimoniaux (BDD Epistemon, BaTyR, éditions)	membre fondateur de l'Equipex Biblissima ; collab. IRHT
REcherches Numériques pour l'éd. des Archives à la Renaissance RENUMAR	http://renumar.univ-tours.fr/	UMR7323 CESR	patrimoine archivistique du Val-de-Loire mi-15 ^e -mi-17 ^e s. (histoire quotidienne)	prend la suite de la BDD « de minute en minute »

Nom de la base	Lien	Laboratoire	Description	Observations
Base Unique de Documentation Encyclopédique (BUDE)	https://bude.univ-tours.fr/php/search.php	UMR7323 CESR-UMR8230 Centre Jean-Pépin	BDD complète sur l'humanisme (- milieu 17 ^e s.)	Europa Humanistica & TradLat; collab. IRHT; Biblissima
Philidor : portail de l'atelier d'étude de la musique française 17-18 ^e s.	http://philidor.cmbv.fr/	UMR7323 CESR-Centre musique baroque Versailles	20000 notices aut., genres, bibliogr., chronol., prosopogr.	contient documentation sur les arts de la scène
Dictionnaires des intraduisibles : vocabulaire des philosophes	http://intraduisibles.org/	UMR8061 Centre Léon-Robin	franç., angl., esp., port., roumain, arabe, persan, russe, ukrainien, chinois, etc.	échantillon en ligne ; avec Max-Planck-Inst., projet ECHO
«Placita» : Opinions des philosophes (présocratiques/préplatoniciens)	http://placita.org/	UMR8061 Centre Léon-Robin	textes grecs et latins, sources, outils sur les présocratiques/préplatoniciens	contient ébauche bibliographique
Marques d'instruments de musique 1860-1919	http://iremus.humanum.fr/marques-instruments-musique/	UMR8223 IRéMus	1172 marques de facteurs déposés au Tribunal de commerce de Paris	contient galerie des images
Association des artistes musiciens	http://iremus.humanum.fr/aam/	UMR8223 IRéMus	liste des sociétaires 1844-1866, 12040 fiches	
Borée	http://iremus.humanum.fr/boree/	UMR8223 IRéMus	1700 références bibliographiques en lien avec Rameau et ses œuvres	
Chronopéra	http://chronopera.free.fr	UMR8223 IRéMus	programme de l'Opéra de Paris de 1749 à 1989	contient fiches des œuvres
Euterpe, la musique en images	http://euterpe.irpmf-cnrs.fr/alexandrie-7/	UMR8223 IRéMus	iconographie musicale occidentale dès le 12 ^e s.	contient bibliographie ; accès restreint car images sous droits
Lexique musical de la Renaissance	http://www.ums3323.paris-sorbonne.fr/LMR/	UMR8223 IRéMus	dictionnaire musical multilingue - traités musicaux en espagnol	interface en franç., esp., angl.
Mercurie galant (Mercuraires et Mercurie-textes)	http://philidor.cmbv.fr/Publications/Catalogues-de-genre	UMR8223 IRéMus	musique en fac-sim., texte chanté et commentaire, indexation	portail Philidor du CMBV et labex OBVIL
Des musiciens radiodiffusés depuis les années trente	http://www.plm.paris-sorbonne.fr/Des-musiciens-radiodiffuses-depuis	UMR8223 IRéMus	index 2185 compositeurs & 2014 interprètes, typologie des programmes	issue d'une thèse de Christophe Bennet (2007)
Musicastallis	http://www.plm.paris-sorbonne.fr/musicastallis/	UMR8223 IRéMus	850 scènes musicales sculptées (stalles médiévales églises européennes)	module diaporama et lexique
Neuma	http://neuma.humanum.fr/	UMR8223 IRéMus	bibliothèque numérique des corpus musicaux patrimoniaux	donne accès aux bases énumérées par la suite
Sequentia (Neuma)	http://neuma.humanum.fr/corpus/sequentia	UMR8223 IRéMus	chant ecclésiastique & contexte liturgique 16 ^e s.-1840	
Timbres (Neuma)	http://neuma.humanum.fr/corpus/timbres	UMR8223 IRéMus	timbres du répertoire des chansons populaires franç. à partir du 17 ^e s.	

Nom de la base	Lien	Laboratoire	Description	Observations
Motet imprimé en France 1647-1789 (Neuma)	http://neuma.humanum.fr/corpus/motetimprime	UMR8223 IRéMus	corpus des incipit	complète le catalogue imprimé publié en 2011
Psautiers (Neuma)	http://neuma.humanum.fr/corpus/psautiers	UMR8223 IRéMus	mélodies support au chant des psaumes (3 psautiers 16 ^e s. & 7 17 ^e s.)	
Répertoire international des sources musicales (Neuma)	http://neuma.humanum.fr/corpus/rism	UMR8223 IRéMus	incipit et notices simplifiées mss musicaux antérieurs à 1800 de la BNF	lien vers catalogue BNF
Francoeur (Neuma)	http://neuma.humanum.fr/corpus/francoeur	UMR8223 IRéMus	airs représentés à l'Académie Royale de Musique de Paris 1688-1733	sauf œuvres de Rameau
Carnet de notes	http://www.iremus.cnrs.fr/fr/base-de-donnees/carnet-de-notes	UMR8223 IRéMus	portail (6 BDD) de recherche sur doc musicaux en ligne sur le web	moteur de recherche musicXml ; les 6 BDD énumérées par la suite
Psaumes (Carnet de notes)	http://www.psautiers.org/	UMR8223 IRéMus	psaumes de tradition réformée française, des origines à 1562 mélodie & txt	contient fichiers audio des psaumes
Raga (Carnet de notes)	http://www.psautiers.org/show.php?id_base=3&id_recueil=6	UMR8223 IRéMus	contient aussi le recueil Raag indoustani	
Andes (Carnet de notes)	http://www.psautiers.org/show.php?id_base=5&mode=default	UMR8223 IRéMus	musiques de danse traditionnelles	
mâluft algérien (Carnet de notes)	http://www.psautiers.org/show.php?id_base=20&mode=default	UMR8223 IRéMus	comparatif des traditions musicales	contient des transcriptions originales
Oupal (Carnet de notes)	http://www.psautiers.org/show.php?id_base=12&mode=default&custom=12	UMR8223 IRéMus	timbres de musiques traditionnelles chinoises	divers matériaux principalement chinois
Syriaque (Carnet de notes)	http://www.psautiers.org/show.php?id_base=12&mode=default&custom=12	UMR8223 IRéMus	hymnodie syriaque de l'Église maronite	
Répertoire de la symphonie française	http://www.ums3323.paris-sorbonne.fr/SYMPHONIES/	UMR8223 IRéMus	symphonies françaises composées à l'époque de Berlioz (1830-1870)	
Electroacoustic music studies Asia network (EMSAN)	http://www.iremus.cnrs.fr/en/base-de-donnees/electroacoustic-music-studies-asia-network-emsan	UMR8223 IRéMus	bibliographie (698 entrées) et œuvres musicales (2359 entrées)	BDD évolutive (chinois, anglais, français, japonais, coréen)

Nom de la base	Lien	Laboratoire	Description	Observations
Thesaurus Musicarum Germanicarum (TMG)	http://tmg.huma-num.fr/	UMR8223 IRéMus	écrits de théorie musicale entre 1490 et 1650 dans la sphère germanique	typographies gothiques, éd. électroniques critiques en XML (TEI.P5)
TRéMiR	http://www.ums3323.paris-sorbonne.fr/TREMIR/	UMR8223 IRéMus	édition et indexation de traités musicaux romans de la Renaissance	
Carnet de veille « Animots - Carnet de zoopoétique »	https://animots.hypotheses.org/	UMR8566 CRAL	propose une veille sur l'actualité littéraire, artistique et scientifique sur l'animalité et les interactions entre les vivants et le monde	
Carnet de recherche « Pôle Proust »	https://poleproust.hypotheses.org/	UMR8566 CRAL	prend acte, à partir du cas de Proust, d'une transversalité de questionnements entre études littéraires, sciences du vivant ou sciences humaines et sociales	
Carnet de recherche du GDRI « Literature & Democracy (19th-21st centuries) »	https://litdemo.hypotheses.org/	UMR8566 CRAL	les activités et les productions du groupe de recherche international « Literature and Democracy »	
Revue Thaêtre	https://www.thaetre.com/	UMR8566 CRAL		
Prix Recherche au présent	https://prp.hypotheses.org/	UMR8566 CRAL	Prix Recherche au présent 20th and 21st-Century French and Francophone Studies International Colloquium	
European narratology network	https://www.narratology.net/	UMR8566 CRAL	The European Narratology Network (ENN) is an association of individual narratologists and narratological institutions.	
Carnet de recherche Genre et création dans l'histoire des arts vivants	https://vivarts.hypotheses.org/	UMR8566 CRAL	Atelier de recherche sur le genre et l'histoire des arts vivants	
Atelier d'histoire culturelle de la danse	https://ahcdanse.hypotheses.org/	UMR8566 CRAL	Le carnet de l'Atelier d'histoire culturelle de la danse	
Medium	http://medium.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	répertoire des mss M-Â et Renaissance reproduits et recensés à l'IRHT	liens vers les bases énumérées par la suite
Bibliothèque virtuelle des mss médiévaux BVMM (Medium)	http://bvmm.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	reproduction totale ou partielle des mss M-Â et 16 ^e s.	consultation (reproduction sur commande)
Initiale (Medium)	http://initiale.irht.cnrs.fr/accueil/index.php	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	catalogue de mss médiévaux enluminés	

Nom de la base	Lien	Laboratoire	Description	Observations
Jonas (Medium)	http://jonas.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	répertoire des textes et mss médiévaux en langue d'oc et d'oïl	
Pinakes/Πινάκες (Medium)	http://pinakes.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	textes et mss grecs	contient bibliographie des mss répertoriés
Bibale	http://bibale.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	collections anciennes et transmission des mss médiévaux	fait partie du cluster Biblissima
Gloss-e	https://gloss-e.irht.cnrs.fr/index.php	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	gloses et commentaires de la bible latine au Moyen Âge	Bible latine 1481, Glose ordinaire, Catena aurea
Base Unique de Documentation Encyclopédique BUDE	https://bude.univ-tours.fr./php/search.php	UMR7323 CESR Tours-UMR8230 Centre Jean-Pépin	BDD complète sur l'humanisme (- milieu 17 ^e s.)	Europa Humanistica & TradLat; collab. IRHT; Biblissima
E-ktobe	http://www.mss-syriaques.org/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	base de données sur les mss syriaques	contient documentation
Corpus of Arabic Legal Documents (CALD)	http://cald.irht.cnrs.fr/php/ilm.php	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	corpus de documents légaux 8 ^e -15 ^e s.	fait partie de l'ERC «Islamic law materialized»
Onomasticon Arabicum	http://onomasticon.irht.cnrs.fr/php/oa.php	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	prosopographie de l'islam médiéval	
Calendoscope	http://calendoscope.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	outil d'aide à l'analyse & identification des calendriers liturgiques M-Â	
Codicologia	http://codicologia.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	vocabulaire multilingue analyse mss (3 bases, dont 1 glossaire arabe)	
Collecta, archive numérique de la collection Gaignières (1642-1715)	https://www.collecta.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	5 569 items (mss, dessins et d'estampes, imprimés, tableaux et objets)	coll. Complète, inventaire de l'antiquaire de son vivant en 1711
Comparatio des chants liturgiques médiévaux	http://comparatio.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	identification des mss liturgiques de l'office	comparaison des versions et des variantes textuelles des mss
Glossaire : latin philosophique médiéval	http://gestion-fiches.irht.cnrs.fr/index/presentation?corpus=-glossaire	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	fiches mss numérisées	contient bibliographie
CMD-F	http://aedilis.irht.cnrs.fr/cmdf/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	catalogue des mss latins avec indication date, lieu ou copiste	
Iter Liturgicum Italicum	https://liturgicum.irht.cnrs.fr/fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	répertoire de mss liturgiques	contient plus de 30 000 fiches de mss
Manuscrits de Chartres	http://www.manuscrits-de-chartres.fr/fr/manuscrits	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	mss de la bibliothèque municipale de Chartres (en cours)	contient bibliographie des mss répertoriés

Nom de la base	Lien	Laboratoire	Description	Observations
CartulR	http://www.cn-telma.fr/cartulR/index/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	répertoire des cartulaires médiévaux et modernes	
RegeCart (regestes des cartulaires)	http://regecart.irht.cnrs.fr/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	571 cartulaires essentiellement d'établissements ecclésiastiques	complémentaire de CartulR ; doc accumulée entre 1942 et 1970
Pierre Lorfèvre	http://lorfevre.irht.cnrs.fr/accueil.html	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	mss de Lorfèvre, chancelier du roi de France 14 ^e s.	éléments de codicologie et héraldique, biographie, bibliographie
Luxury bound	http://www.cn-telma.fr/luxury-bound/index/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	corpus mss illustrés aux anciens Pays-Bas 1400-1550	contient bibliographie des mss répertoriés
Catalogue des mss liturgiques médiévaux et modernes	http://www.cn-telma.fr/liturgie/index/	UPR841 IRHT (rattachement secondaire s35)	répertoire de mss (notices complètes)	possibilité de consultation photos numériques en ligne
Chronocarto	https://www.chronocarto.eu/	UMR8546 AOrOc (rattachement secondaire s35)	portail de cartographie et BDD principalement archéologiques	accès aussi à coll. AOrOc Nakala, outils d'exploitation de données
EMAN	http://eman-archives.org/	UMR 8132, ITEM (sc35)	plate forme d'édition de manuscrits et de fonds d'archives numériques	

Annexe VI - Tableau des revues du périmètre de la section 35

Titre	Laboratoires	Éditeur	Date création	Périodicité	Support	Langues
<i>Accademia</i>	UMR8584	Société Marsile Ficini	2004 (?)	annuelle	papier	mul.
<i>Acta Musicologica</i>	UMR7323	Bärenreiter/Société internationale de musicologie	2000	annuelle	papier	mul.
<i>Agôn Revue des arts de la scène</i>	UMR5317, ENS Lyon	Collectif Agôn	2007	annuelle	en ligne	angl., franç.
<i>Aitia Regards sur la culture hellénistique au XXI^e siècle</i>	UMR5189	ENS Lyon	2011	annuelle	en ligne	mul.
<i>Aleph-Historical Studies in Science & Judaism</i>	UMR7219	Univ. Hébraïque de Jérusalem	2001	semestrielle	double	angl.
<i>Alter: Revue de phénoménologie</i>		Association Alter	1993	annuelle	double	angl., franç., all., esp.
<i>Anatolia antiqua</i>	USR3131	IFEA-de Boccard	1988	annuelle	papier	mul.
<i>Annales. Histoire, sciences sociales</i>	UMR8131, 8558	éd. de l'EHESS	1929	trimestrielle	double	franç.
<i>Apocrypha</i>	UMR8584	Brepols	1990	annuelle	double	angl., franç.
<i>Arabian Humanities (ex Chroniques yéménites)</i>	USR3141	CEFAS avec le concours du CNRS (INSHS)	2013	semestrielle	double	angl., franç., arabe
<i>Arabic Sciences and Philosophy</i>	UMR7219	Cambridge University Press	1991	semestrielle	papier	angl., franç.
<i>Archives d'histoire doctrinale et littéraire du Moyen-Âge</i>	UMR8584	Vrin	1926	annuelle	double	angl., franç., ital.
<i>Archives de philosophie</i>	UMR8547	Centre Sèvres Facultés jésuites de Paris	1922	trimestrielle	double	franç.
<i>Archivum Latinitatis Medii Aevi (ALMA)</i>	UPR 841	Union Académique Internationale	1924	annuelle	papier	mul.
<i>Arrêt sur scène/Scène focus</i>	UMR5186	UMR5186	2012	annuelle	en ligne	angl., franç.
<i>Arteologie: recherche sur les arts, le patrimoine et la littérature de l'Amérique</i>	UMR8566	EHESS	2011	semestrielle	en ligne	mul.
<i>Arts of War and Peace</i>	UNR8225		2013	irrégulière	papier	angl.
<i>Astériorion</i>	UMR5317, 5206	ENS éditions	2003	annuelle	en ligne	franç.
<i>Autour de Vallès</i>	UMR5317, 5611	Assoc. des amis de Vallès	1982	annuel	en ligne	franç.
<i>Bibliographie Annuelle du Moyen Âge Tardif (BAMAT)</i>	UPR 841	Brepols	1991	annuelle	papier	franç.
<i>Biological Theory</i>	UMR8129	Springer	2005	trimestrielle	double	angl.

Titre	Laboratoires	Éditeur	Date création	Périodicité	Support	Langues
<i>Biology and Philosophy</i>	UMR8129	Springer	1986	5 n/an	double	angl.
<i>Bulletin d'études orientales (BEO)</i>	USR3135	IFPO (Institut français du Proche Orient)	1931	annuelle	double	franç., arabe, angl., esp.
<i>Bulletin d'informations proustiennes</i>	UMR8132	rue d'Ulm	1975	annuelle	double	franç.
<i>Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines</i>	USR3337	Institut Français d'Etudes Andines	1972	3 n/an	en ligne	franç., esp.
<i>Bulletin de la société Chateaubriand</i>	UMR5317	Société Chateaubriand, Manucius (diff.)	1930 et 1955	annuelle	papier	franç.
<i>Bulletin de la Société française de philosophie</i>		Vrin	1901	trimestrielle	papier	franç.
<i>Bulletin de la Société J-K Huysmans</i>	UMR8132	H. Champion	1928	annuelle	papier	franç.
<i>Cahiers POURPRE (ex Cahiers centre de rech. Réforme et contre-Réforme)</i>	UMR5317	Presses Universitaires Blaise-Pascal	2018	annuelle	papier	angl., franç., all., ital.
<i>Cahiers Claude Debussy</i>	UMR8223	Centre de documentation Claude Debussy	1974	annuelle	papier	franç.
<i>Cahiers de civilisation médiévale</i>	UMR7302	CÉSCM	1958	trimestrielle	papier	franç.
<i>Cahiers du GADGES</i>	UMR5317	UMR5317 IHRIM - Lyon3, diff. Droz	2003	annuelle	papier	franç.
<i>Cahiers du MIDEO</i>	UMR7219	Peeters	2004	18 mois	papier	angl., franç.
<i>Cahiers Edmond et Jules de Goncourt</i>	UMR8132	Société des Amis des frères Goncourt	1994	annuelle	papier	franç.
<i>Cahiers Elisabethains</i>	UMR5186	IRCL	1972	semestrielle	papier	anglais
<i>Cahiers George Sand</i>	UMR5317	Association des amis de George Sand	1976	annuelle	papier	franç.
<i>Chôra. Revue d'études anciennes et médiévales</i>	UMR8061	Polirom, Vrin	2003	annuelle	papier	mul.
<i>Chroniques de Port-Royal</i>		Société des amis de Port-royal, Vrin diff.	1950	annuelle	double	franç.
<i>Chrysopoëia</i>	UMR8230	Edidit	1987	biannuelle	papier	franç.
<i>Controverses. Revue d'idées</i>		Editions de l'Eclat	2006	semestrielle	papier	franç.
<i>Courrier du centre International Blaise Pascal</i>	UMR5317	Presses Universitaires Blaise-Pascal	1979	annuelle	double	franç.
<i>Criticón</i>	UMR5317	Presses Universitaires du Midi	1977	quadrimes- trielle	double	esp.
<i>Critique</i>	UMR 8566	éd. de Minuit	1946	mensuelle	papier	angl., franç., ital.
<i>Critique d'art</i>	GIS Uni Rennes2	Archives de la critique d'art	1993	semestrielle	double	angl., franç.

Titre	Laboratoires	Éditeur	Date création	Périodicité	Support	Langues
<i>Culture et musées</i>	UMR8562	Actes Sud (jusqu'en 2015) et Uni Avignon	2003	semestrielle	double	franç.
<i>Demeter</i>	CEARC Lille3	Centre d'Etude des Arts contemporains	2002	biannuelle	en ligne	franç.
<i>Dialectica. International Journal of Philosophy</i>	UMR 8129	Blackwell-Wiley Publishing.	1947	trimestrielle	double	mul.
<i>Disputatio. International Journal of Philosophy</i>	UMR 8129	The Philosophy Centre of the University of Lisbon	1996	trimestrielle	papier	angl.
<i>Double Jeu : théâtre et cinéma</i>		Presses Universitaires de Caen	2003	annuelle	double	franç.
<i>Ebisu - Études japonaises</i>	USR3331	Maison franco-japonaise	1993	semestrielle	en ligne depuis 2014	franç.
<i>Épistémocritique : littérature et savoirs</i>	Uni Franche-Comté	Association Épistémocritique	2007	semestrielle	en ligne	franç.
<i>Études phénoménologiques</i>	UMR 8547	Ousia Bruxelles	1985	semestrielle	papier	angl., franç.
<i>Etudes photographiques</i>	UMR 8566	Société française de photographie	1996	irrégulière	double	franç. angl,esp, port
<i>Études ricuriennes/Ricur Studies</i>	FRE 2023	University Library system Uni. Pittsburg	2010	semestrielle	en ligne	angl.
<i>European Journal of Pragmatism and American Philosophy</i>	FRE 2023	Associazione Culturale Pragma	2009	semestrielle	en ligne	angl., + depuis 2017 franç., ital., esp., all.
<i>Exercices de rhétorique</i>	UMR5316	UGA éditions	2013	semestrielle	en ligne	franç.
<i>Extrême Orient, extrême Occident</i>	UMR 7219	Presses Universitaires de Vincennes	1982	1 ou 2 par an	double	angl., franç.
<i>Féeries</i>	UMR5316	UGA éditions	2004	annuelle	double	franç.
<i>Flaubert, revue critique et génétique</i>	UMR 8132	équipe Flaubert de l'ITEM		semestrielle	en ligne	mul.
<i>Gaia</i>	UMR5316	UGA éditions	1996	annuelle	double	mul.
<i>Gazette du Livre Médiéval</i>	UPR 841	Bibliothèque de l'Institut de recherche et d'histoire des textes	1982	annuelle	double	franç.
<i>Genesis -revue internationale de critique génétique</i>	UMR 8132	PUPS	1992	semestrielle	double	franç.
<i>Heidegger Studies</i>	UMR 8547	École Normale Supérieure Paris (Heidegger-Studies)	1986	annuelle	papier	mul.
<i>Histoire, médecine et santé</i>	UMR5136 et al.	Presses Universitaires du Midi	2012	semestrielle	double	angl., franç.
<i>Igitur - Arguments philosophiques</i>	UMR7304	Univ. Aix-Marseille depuis 2020 (en ligne)				

Titre	Laboratoires	Éditeur	Date création	Périodicité	Support	Langues
<i>Images re-vues</i>	UMR8566 et al.	hébergée par le CRAL	2004	1 ou 2 par an	en ligne	franç.
<i>Interfaces</i>	UMR8225, MSH Dijon et al.	Uni Bourgogne et College of the Holy Cross (Mass. USA)	1991	semestr. 2018	double	angl., franç.
<i>IRIS</i>	UMR5316	UGA éditions	1990	annuelle	papier	franç.
<i>Journal de recherche en éducation musicale</i>	UMR8223	collection OMF	2002	1 à 2 par an	double	franç.
<i>Journal électronique d'histoire des probabilités et de la statistique</i>	UMR 8557		2005	1 à 2 par an	en ligne	angl., franç.
<i>Journal of Cognition & Culture</i>	UMR 8129	Brill	2001	trimestrielle	double	angl.
<i>Journal of Philosophical Logic</i>	UMR 8129	Springer	1971	trimestrielle	double	angl.
<i>Journal of Semantics</i>	UMR 8129	Oxford Academics	1982	quadrimestrielle	double	angl.
<i>Journal of Social Ontology</i>	UMR 8129	de Gruyter	2015	semestrielle	double	angl.
<i>La Lettre clandestine</i>	UMR5317	Classiques Garnier	1992	annuelle	papier	franç.
<i>La Revue russe</i>	UMR 8132	association française des russisants	1991	semestrielle	papier	franç.
<i>Lalies Sessions de linguistique et littérature</i>	UMR8546	éd. Rue d'Ulm	1980	annuelle	double	mul.
<i>Le Débat</i>		Gallimard	1980	bimestrielle	papier	franç.
<i>Le Fablier</i>	UMR 8599	Société des Amis de Jean de La Fontaine	1988	annuelle	papier	franç.
<i>Le français préclassique 1500-1650</i>	UMR5317	Honoré Champion	1990	annuelle	papier	
<i>Le jardin de Musique</i>	UMR 8223	Assoc. Musique ancienne en Sorbonne	2004	semestrielle	en ligne	franç.
<i>Les cahiers du CAMS</i>	UMR 8557	CAMS	1994	irrégulière	polycopiés en ligne	bilingue
<i>Les Cahiers naturalistes</i>	UMR8132	Société littéraire des Amis d'Émile Zola/ITEM-CNRS/GRASSET	1955	annuelle	papier	franç.
<i>Les Études philosophiques</i>	UMR8061	PUF	1926	trimestrielle	double	franç.
<i>Lexique</i>	UMR 8163	Presses Universitaires du Septentrion		annuelle	en ligne	angl., franç.
<i>Libertinage et philosophie au XVIIe siècle</i>	UMR5317	Classiques Garnier	1997	annuelle	double	franç.
<i>Ligeia : dossiers sur l'art</i>		éd. Ligeia	1988	semestrielle	papier	angl., franç.
<i>Lingua</i>	UMR 8163	Elsevier	1949	mensuelle	double	angl.
<i>Linguistic Inquiry</i>	UMR 8163	The MIT Press	1970	trimestrielle	double	angl.
<i>Linguistics and Philosophy</i>	UMR 8129	Springer	1977	trimestrielle	double	angl.

Titre	Laboratoires	Éditeur	Date création	Périodicité	Support	Langues
<i>Marges, revue d'art contemporain</i>	UMR8566	Presses Universitaires de Vincennes	2003	1 ou 2 par an	papier	franç.
<i>Mathématique et sciences humaines/Mathematics and social sciences</i>	UMR 8557	CAMS - EHESS	1962	trimestrielle	en ligne	angl., franç.
<i>Metaphor and Symbol</i>	UMR 8129	Taylor & Francis	1997	trimestrielle	double	angl.
<i>Methodos</i>	UMR 8163	UMR8163	2001	annuelle	en ligne	angl., franç.
<i>Mind and Language</i>	UMR 8129	Wiley online library	1986	annuelle	en ligne	angl.
<i>MusiqueImagesInstruments</i>	UMR8223	CNRS Éditions	1995	annuelle	papier	angl., franç.
<i>Musurgia, Analyse et Pratique Musicales</i>	UMR 8223	ESKA	1994	trimestrielle	double	franç.
<i>Natural Language Semantics</i>	UMR 8129	Springer	1993	3 n/an	double	angl.
<i>Nemo - Online</i>	UMR 8223	ICONEA	2011	annuelle	en ligne	mul.
<i>Nouvelle revue d'esthétique</i>		société française d'esthétique	2008	annuelle	papier	franç.
<i>Orages Littérature et culture 1760-1830</i>	UMR5317, 5611	Association Orages, diff. Éditions Atlande	2002	annuelle	double	franç.
<i>Oriens-Occidens</i>	UMR 7219	SPHERE (UMR7219) diff. Vrin	1997	annuelle	papier	angl., franç.
<i>Perspective: actualité en histoire de l'art</i>	INHA	INHA	2006	semestrielle	double	angl., franç.
<i>Perspectives chinoises/China Perspectives</i>	UMR 8566/ USR3331		1992	trimestrielle	double	franç., angl
<i>Philosophia Scientiae</i>	UMR 7117	éd. Kimé	1996	semestrielle	double	mul.
<i>Philosophie antique. Problèmes, renaissances, usages</i>	UMR8061, 8230	Presses Universitaires du Septentrion	2001	annuelle	papier	franç.
<i>Philosophy Compass</i>	UMR8129	Wiley online library	2006	mensuelle	en ligne	angl.
<i>Plastik: art et science</i>	UMR8218	Centre d'étude et de recherche en arts plastiques Paris1	2011	annuelle	en ligne	angl., franç.
<i>Pragmata</i>	FRE 2023	Association francophone d'études pragmatistes	2018	annuelle	en ligne	franç.
<i>Recherches et travaux</i>	UMR5316	UGA éditions	1981	semestrielle	double	franç.
<i>Recto-verso</i>	UMR 8132	ITEM	2007	semestrielle	en ligne	mul.
<i>REVISTAS TRACE</i>	USR 3337	CEMCA	1995	semestrielle	papier	esp.
<i>Revue d'étude du jazz et des musiques autodidactes</i>	UMR8223	Centre de Rech. Internat. Jazz et Musiques Audiotactiles	2018	annuelle	en ligne	angl., franç., ital., port.
<i>Revue d'histoire des sciences</i>	USR 3608	Armand Colin	1947	semestrielle	double	franç.

Titre	Laboratoires	Éditeur	Date création	Périodicité	Support	Langues
<i>Revue d'histoire des textes</i>	UPR 841	Brepols	1950	annuelle	double	mul.
<i>Revue d'histoire et de philosophie religieuses</i>		Faculté de théologie protestante de Strasbourg	1921	annuelle	double	franç.
<i>Revue d'histoire littéraire de la France</i>	UMR 8132, 5611	PUF	1894	trimestrielle+un vol. bibliogr.	double	franç.
<i>Revue de l'A.I.R.E. (assoc. Internationale de recherches sur l'épistolaire)</i>	UMR 8599	Champion	1982	annuelle	papier	franç.
<i>Revue de l'histoire des religions</i>	UMR5317	Collège de France - Armand Colin	1880	trimestrielle	double	franç.
<i>Revue de métaphysique et de morale</i>	UMR 8163	PUF	1893	trimestrielle	double	franç.
<i>Revue de musicologie</i>	UMR 8223, 7323	Société française de musicologie	1917	semestrielle	double	franç.
<i>Revue de philosophie économique</i>	UMR7304	Vrin	2000	semestrielle	double	angl., franç.
<i>Revue de Synthèse</i>	USR 3608	Springer	1900	trimestrielle	double	mul.
<i>Revue des études augustiniennes et patristiques</i>	UMR8584	Institut d'études augustiniennes/Brepols	1955	semestrielle	double	angl., franç., all., ital., esp.
<i>Revue des études juives</i>	UMR8584, UPR 841	Peeters	1880		papier	mul.
<i>Revue des études slaves</i>	UMR 8224	Institut d'études slaves	1921	trimestrielle	double	mul.
<i>Revue des femmes philosophes</i>	UMR8238	UNESCO: Réseau international des femmes philosophes	2011	annuelle	double	franç., angl
<i>Revue des sciences philosophiques et théologiques</i>		Vrin	1907	trimestrielle	double	franç.
<i>Revue des traditions musicales des mondes arabe et méditerranéen</i>	UMR8223 et Uni Antonine Liban	éditions de l'Université Antonine et éd. Geuthner	2007	annuelle	double	franç.
<i>Revue germanique internationale</i>	UMR 8547	CNRS Éditions	2005	semestrielle	double	franç.
<i>Revue Mabillon</i>	UMR8584	EPHE et société Mabillon	1990 (N.S.)	annuelle	double	angl., franç., all., ital., esp.
<i>Revue philosophique de la France et de l'Étranger</i>		PUF	1876	trimestrielle	double	mul.
<i>Revue Voltaire</i>	UMR8599, 5317	Société des études voltairiennes, PUPS	2001	annuelle	papier	franç.
<i>Rivista di Filologia Cognitiva - Cognitive Philology a.c. 2008</i>	UMR 8129	La Sapienza	2003	annuelle	en ligne	ital., angl.
<i>Romantisme</i>		Société des études romantiques et dix-neuviémistes, Dunod diff.	1971	trimestrielle	double	franç. (+ angl. en perspective)

Titre	Laboratoires	Éditeur	Date création	Périodicité	Support	Langues
<i>Rursus-Spicae</i>	UPR 841 et al.		2017	semestrielle	en ligne	mul.
<i>Scriptorium</i>	UPR 841 et al.	Bibliothèque Royale de Belgique	1946	semestrielle	double	angl., franç., all., ital., esp.
<i>Semantics & Pragmatics</i>	UMR 8129, 8163	Linguistic society of America	2008	annuelle	en ligne	angl.
<i>Semitica et Calssica</i>	UMR8167 et al.	Brepols	2008	annuelle	double	angl., franç., all., ital., esp.
<i>Sociologie de l'art OPuS</i>	UMR5316	L'Harmattan	1992	quadrimes- trielle	double	franç.
<i>Syria</i>	USR3135	IFPO (Institut français du Proche Orient)	1920	annuelle	double	franç., angl., ital., esp., résumée en arabe
<i>Tetrade</i>	UMR 8566	Univ de Picardie Jules Verne	2014	annuelle	en ligne	franç.
<i>Textimage Revue d'étude du dialogue texte-image</i>	UMR5317		2007	annuelle	en ligne	franç.
<i>Textuel</i>	UMR 8132	Hermann			papier	franç.
<i>The Monist</i>	UMR 8129	Hegeler Institut	1890	trimestrielle	double	angl.
<i>Théâtre/Public</i>	UMR5317	Association Théâtre/ Public, diff. Les éd. théâtrales (Montreuil)	1974	trimestrielle	papier	franç.
<i>TheoRèmes</i>	Uni Montréal, Laval, EHESS et al.		2011	semestrielle	en ligne	angl., franç.
<i>Thinking and Reasoning</i>	UMR 8129	Taylor & Francis	1996	trimestrielle	double	angl.
<i>Tracés Revue de sciences humaines</i>	ENS Lyon	ENS éditions	2002	semestrielle	double	franç.
<i>Trafic</i>	UMR 8566	POL		trimestrielle	papier	franç.
<i>Transposition: musique et sciences sociales</i>	UMR 8566	revue hébergée par l'UMR (initiative doctorants EHESS)	2011	annuelle	en ligne	franç.
<i>TVSeries</i>	UMR8225		2012	semestrielle	en ligne	franç., angl
<i>Universitas, Monthly Review on Philosophy and Culture</i>	UMR 8566			annuelle		angl.
<i>Viatica</i>	CELIS Clermont2	Presses Universitaires Blaise-Pascal	2014	annuelle	en ligne	franç.
<i>Volume!</i>		Les éditions Mélanie Seteun	2002	semestrielle	double	franç.

Notes

(1) Le tableau de l'Annexe IV montre la variété des langues modernes et anciennes impliquées dans les publications et dans les recherches des unités de la section 35. Le français et l'anglais, considérées comme des langues par défaut pour tous les laboratoires, ne sont pas mentionnés dans la colonne des langues.

(2) Dans le cadre du plan de soutien à l'édition de revues scientifiques, le comité de suivi de l'édition scientifique du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation propose d'apporter un concours financier à des projets innovants dans le domaine de la traduction, visant en particulier à améliorer la visibilité et la notoriété internationale de revues scientifiques françaises. Le regret qu'inspire ce projet est qu'il continue selon une logique favorisant l'anglais comme langue de communication au détriment du français et du multilinguisme.

(3) Dans HAL, les métadonnées peuvent être complétées dans les deux langues. Mais ce sont principalement les métadonnées en anglais qui servent à l'indexation des publications dans les grandes bases bibliométriques mondiales, comme le WoS, qui servent de base pour toutes les études bibliométriques, y compris de l'OST (français!).

(4) Dans le tableau « collections et ressources », on trouvera des ressources très diverses comme les carnets de recherches, éditions électroniques, corpus, etc., ainsi que certaines revues en complément de celles du tableau spécifique « revues ». Des ressources électroniques de ce tableau peuvent se trouver aussi dans le tableau des « bases de données ». Nous avons préféré maintenir quelques doublons plutôt que de perdre des informations.

SECTION 36

SOCIOLOGIE ET SCIENCES DU DROIT

Composition de la section

Jay ROWELL (Président de section), Romain PUDAL (secrétaire scientifique), Valérie BOUSSARD, Luisa BRUNORI, Bernard CORMINBOEUF, Éric DAGIRAL, Magali DREYFUS, Mustapha EL MIRI, Valérie FALCK, Élisabeth FORTIS, Violaine GIRARD, Séverine GOJARD, Martine KALUSZYNSKI, Jean-Pierre LE CROM, Olivier LECLERC, Laurent LESNARD, Frédéric NEYRAT, Paul PASQUALI, Jocelyne PICHOT-DOULCIER, Laurence PROTEAU, Emmanuelle RIAL-SEBBAG.

I. Introduction

La section 36 regroupe des unités de recherche et des chercheurs relevant de la sociologie et du droit. La chute de presque 30 % de ses effectifs chercheurs depuis le début des années 2000 et les projections de départs à la retraite sur les prochaines années plaident pour une politique ambitieuse de recrutements afin de maintenir la présence du CNRS sur l'ensemble du territoire tout en accompagnant les thématiques et méthodes de recherche émergents. Ce constat vaut *a fortiori* pour les emplois de soutien à la recherche (ITA) dont le rôle est indispensable.

Les travaux menés dans les unités dépendant de la section s'appuient sur des méthodes « mixtes » quantitatives et qualitatives et le développement de nouvelles méthodes de collecte et d'analyse de données (numérique, *big data*, intelligence artificielle). En termes de thématiques, les travaux peuvent être regroupés en

8 thématiques : (1) Stratification sociale et inégalités, (2) Mondes marchands et travail, (3) Rapports sociaux de sexe, (4) Circulations et migrations internationales, (5) Santé et environnement, (6) Mobilisations, justice, violence, (7) Numérisation, données, objets connectés, (8) Nouvelles normativités et usages du droit. Cette présentation, qui ne prétend pas à l'exhaustivité, n'exclut pas l'existence de travaux de pointe sur d'autres thématiques.

La section souligne la nécessité de conserver un équilibre raisonnable entre recherche fondamentale non planifiée d'un côté, et programmes orientés par la demande sociale, la promotion de l'interdisciplinarité et de l'internationalisation, de l'autre. Par ailleurs, le contexte actuel est marqué par la remise en cause de l'utilité des SHS sous la conjonction d'une lecture étroite des finalités de la recherche en termes de retombées économiques et d'un réflexe autoritaire qui prétend que la compréhension des dynamiques sociales revient à excuser des comportements déviants au lieu de

représenter un préalable à la recherche démocratique de solutions. Le présent rapport entend souligner l'importance des contributions des UMR de la section au débat démocratique et à la diffusion des savoirs. À une époque où les transformations sociétales paraissent complexes, souvent illisibles et prises dans l'écheveau complexe des interdépendances internationales, la sociologie et les sciences juridiques n'ont jamais été aussi indispensables.

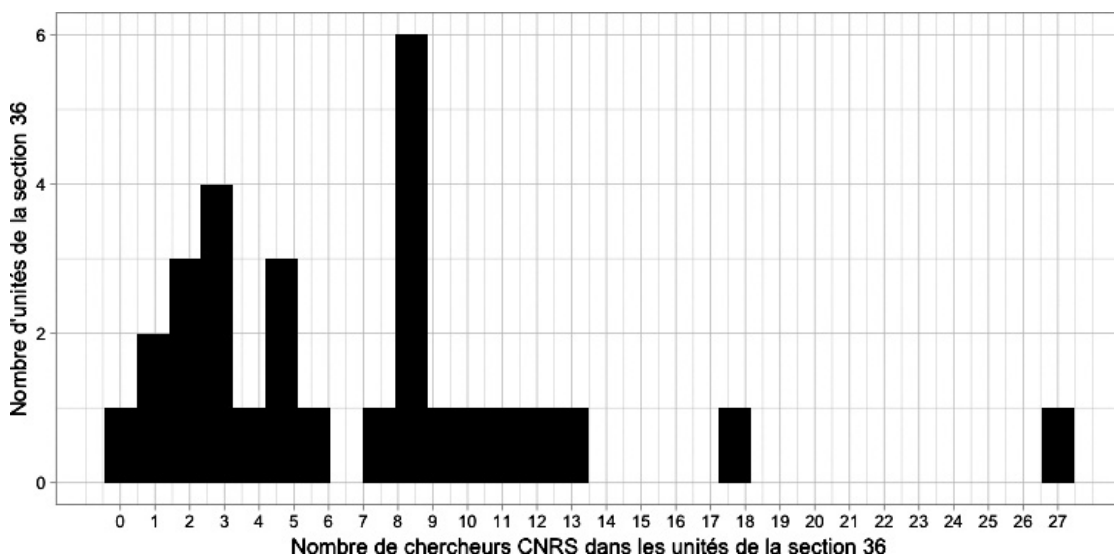
II. Présentation de la section

A. Structure de la section

1. Unités

La section 36 assure le pilotage principal de 27 UMR, 5 USR, 2 UMS, 3 GDR, 2 FRE et 1 UMI.

Les UMR relèvent pour moitié du droit et pour moitié de la sociologie, pour un effectif chercheur composé d'un rapport d'environ deux-tiers sociologues et un-tiers juristes. Il faut noter que 29 autres unités de recherche sont rattachées à la section 36 à titre secondaire. Un peu plus de la moitié des UMR de la section sont localisées en Île-de-France (15), une concentration plus marquée en sociologie (71%) qu'en droit (38%). Ces UMR sont de taille assez variée. Un quart compte 30 permanents ou moins et un quart compte plus de 60 permanents avec seulement deux qui dépassent un effectif de 90 permanents. Les structures de recherche de la section 36 sont, en général, dotées d'un nombre limité de chercheurs CNRS. En effet, dans la moitié d'entre elles on trouve au plus 6 chercheurs CNRS. Dans seulement un laboratoire sur cinq on trouve 10 chercheurs CNRS ou plus. Cette relative concentration des chercheurs- géographiquement et par unité – signifie qu'à peu près la moitié des chercheurs sont concentrés dans 20% des unités.



Si en moyenne, les structures de recherche de la section 36 semblent plutôt bien pourvues en personnels de soutien (5.8 personnes par

unité), la répartition est assez inégale : la moitié des personnels ITA se trouve concentrée dans seulement 27% des unités de la section.

Il est possible d'établir une typologie des unités qui relèvent de la section selon le nombre de chercheurs CNRS, d'enseignants-chercheurs ou chercheurs d'autres organismes, d'ITA et BIATSS. Le type d'unité le plus répandu (48%) se caractérise par un nombre limité de chercheurs mais par un bon soutien en personnels ITA : en moyenne 7 chercheurs CNRS, 18 titulaires non CNRS et 6 ITA/BIATSS. Dans le deuxième type d'unité (28%) le nombre moyen de chercheurs CNRS est plus faible (4) alors que celui des enseignants-chercheurs est beaucoup plus élevé (42). Les deux derniers types d'unité sont plus marginaux et se caractérisent par une présence moyenne des chercheurs CNRS un peu plus forte mais un nombre encore plus important d'enseignants-chercheurs. Deux laboratoires n'entrent pas dans cette typologie, un laboratoire qui ne comporte actuellement aucun chercheur et le plus gros laboratoire de la section 36 qui ne se caractérise pas seulement par le nombre très élevé de chercheurs CNRS et d'enseignants-chercheurs. Il est à noter que les laboratoires à dominante juridique ont en moyenne moins de chercheurs, et se situent majoritairement hors Ile-de-France. Certains se trouvent ainsi fragilisés par le faible nombre de recrutements. La problématique est comparable en sociologie du fait de la forte concentration des chercheurs dans les unités en Ile-de-France. Hormis quelques unités de province qui tirent leur épingle du jeu, la place du CNRS dans un nombre relativement important d'UMR sera fragilisée sans une politique plus volontariste sur le nombre de postes mis au concours et leur affectation.

2. Chercheurs

Les 198 chercheurs de la section en activité en mai 2019 sont affectés à 54 UMR différentes qui ne relèvent pas nécessairement, loin s'en faut, de la section 36 à titre principal. La répartition des chercheurs de la section 36 entre juristes (32%) et sociologues (68%) est stable depuis le dernier rapport et la proportion est relativement constante et proportionnelle au

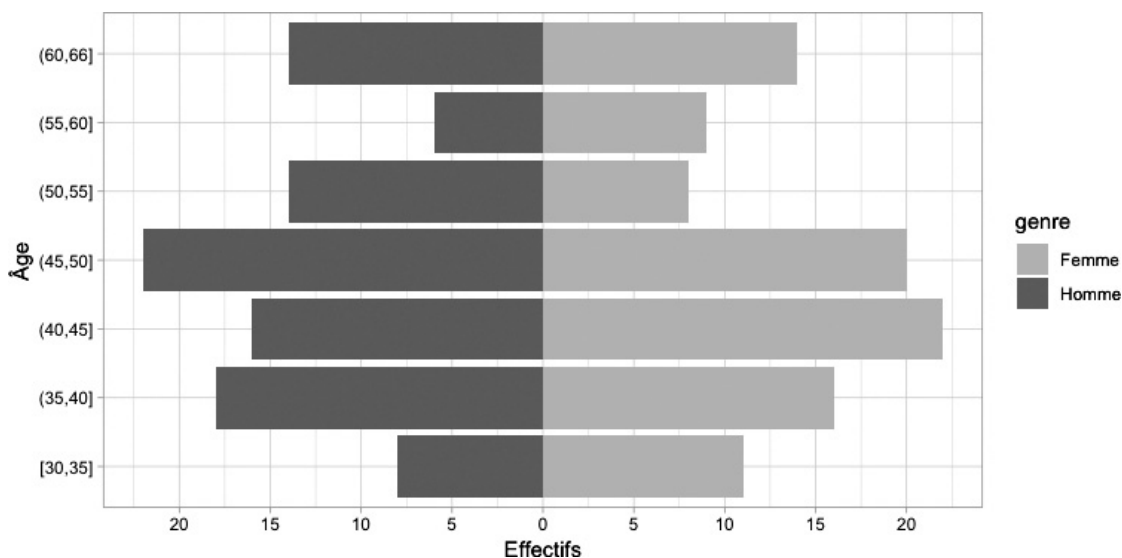
sein de tous les corps et grades sauf pour les DR1 (48% des 27 DR1 sont juristes).

Les chercheurs de la section 36 sont très concentrés en région parisienne avec un taux de 62%, là encore relativement stable par rapport au précédent rapport (65%), mais inégal entre les deux disciplines avec 72% des sociologues et 38% des juristes affectés à des unités franciliennes.

Si la section 36 est globalement équilibrée du point de vue du genre (51% de femmes par rapport à 48% en 2014), le taux de féminisation apparaît bien supérieur pour les juristes (67%) que pour les sociologues (43%). Si on prend en compte le corps et le grade ainsi que la discipline (voir tableau ci-dessous), alors il apparaît que les femmes sont sur-représentées au niveau DR2 (56%) et sous-représentées au niveau DR1 (37%), les sociologues ayant un taux de féminisation de seulement 21% en DR1 comparé à 54% pour les juristes. Ces deux phénomènes s'expliquent largement par un accès plus tardif au grade de DR2 pour les femmes (voir *infra*).

Corps - Grade	N	Femmes (%)	Femmes juristes (%)	Femmes sociologues (%)
DRCE	4	50	0	67
DR1	27	37	54	21
DR2	48	56	67	52
CRHC	5	60	100	50
CRCN	114	51	73	42
Total	198	51	67	43

Comme le prévoyait le précédent rapport, il y a bien eu un pic de départs à la retraite mais décalé de deux ans (9 départs en 2018 et 6 en 2016). Toutefois, ce pic reste loin des départs massifs des années 2009-2013 qui correspondaient à la centaine de chercheurs entrés au CNRS entre 1978 et 1980 à l'occasion de l'intégration des chercheurs dits « hors statuts ». La pyramide des âges actuelle est désormais plus équilibrée.



3. Personnels ITA

Le CNRS apporte une contribution significative au soutien à la recherche avec, 96 personnels ITA affectés aux unités de la section, représentant 57% du total des personnels de soutien à la recherche. Ne sont considérés par la suite que les ITA du CNRS. Les unités relevant de la section 36 comptent 11 IR, 56 IE et 29 techniciens qui se répartissent comme suit : 31 % BAP D (SHS), 5 % BAP E (Informatique, statistique et calcul scientifique), 21 % BAP F (Culture scientifique, communication); 43 % BAP J (Gestion et pilotage). Compte tenu de la montée en puissance des méthodes statistiques, des humanités numériques et du *big data*, le potentiel des unités en ingénieurs BAP D devrait être significativement renforcé au risque de voir les disciplines relever de la section 36 décrocher au niveau international sur ces enjeux majeurs.

Ce risque est d'autant plus important que la structure par âge et par sexe des ITA des unités de la section 36 montre un double déséquilibre : les effectifs apparaissent concentrés sur les femmes de 45 ans et plus qui représentent environ deux-tiers des effectifs totaux d'ITA.

Les raisons de ce double déséquilibre sont certainement multiples, mais l'examen de la pyramide des âges des agents ITA de la section 36 par BAP donne quelques pistes. Le déséquilibre générationnel particulièrement prononcé dans les BAP D et F, ce qui montre que la priorité a été donnée au recrutement de gestionnaires dans un contexte de complexification des circuits administratifs et de la recherche sur contrat, par rapport à la BAP disciplinaire (D) et à la BAP F, indispensable au bon fonctionnement des revues. On ne peut que déplorer ce sous-investissement chronique, ces dernières années, dans les personnels ITA, porteur de conséquences lourdes à l'avenir (voir *infra*).

4. Emplois permanents et non permanents

Le bon fonctionnement des unités dépend également de personnels non permanents. Du côté des chercheurs et des enseignants-chercheurs, le taux de précarité, de l'ordre de 10%, est stable depuis le précédent rapport. Du côté des personnels de soutien à la recherche non permanents, le taux de contractuels

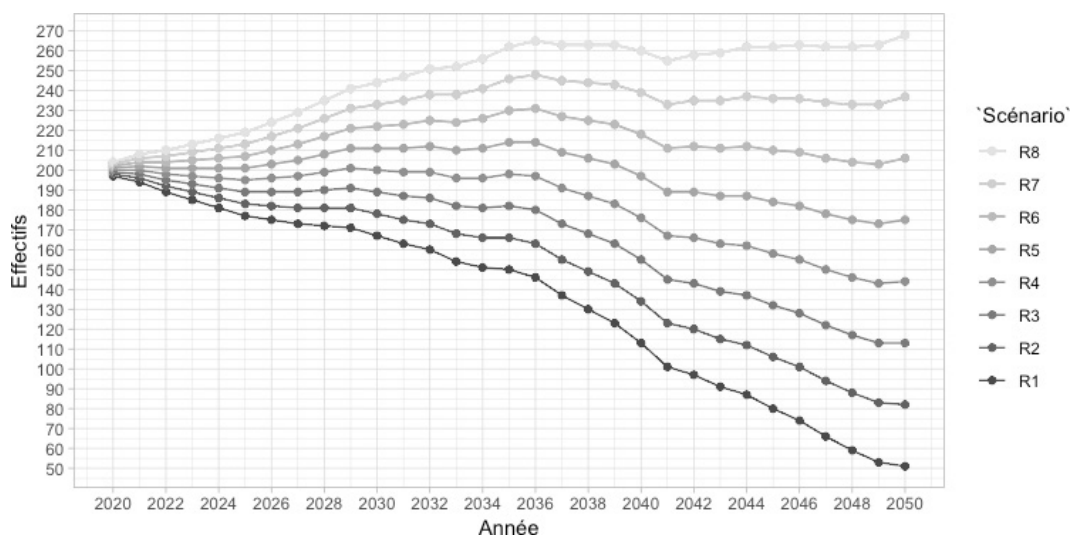
est de 31 %, très élevé, mais en nette baisse par rapport au précédent rapport où il était de 60 %. On peut faire l'hypothèse que cette baisse de la précarité est en grande partie liée au changement de statut des BIATTS dont la proportion dans les unités de la section 36 a presque doublé en cinq ans.

B. Projections sur l'évolution des effectifs

1. Chercheurs et ITA

La génération de chercheurs recrutés massivement entre 1978 et 1980 est en majorité partie à la retraite dans les années 2008-2013. En l'absence d'une politique de recrutement visant à maintenir le nombre de chercheurs dans la section 36, les effectifs de la section 36 sont passés de 286 en 2000 à 198 en 2019, une chute d'un peu moins de 30 %, ce qui a eu pour effet la fragilisation de la place du CNRS dans de nombreuses UMR. La pyra-

mide des âges des chercheurs CNRS est désormais relativement équilibrée et les départs à la retraite ne devraient plus connaître les pics des dix dernières années. Si l'on fait l'hypothèse d'un âge uniforme de départ à la retraite de 67 ans, alors les départs à la retraite devraient suivre une tendance presque linéaire avec en moyenne environ 6 départs par an. En toute logique, si le nombre de recrutements devait être inférieur à ce chiffre, la taille de la section ne pourrait que continuer à décliner, comme cela avait été souligné dans les rapports de 2010 et de 2014. Comme l'indiquent les projections d'effectifs à partir de la structure démographique actuelle selon plusieurs scénarios (1 à 8 postes par an), seule une politique de recrutement de 6 chercheurs par an devrait permettre de maintenir la taille de la section 36 à l'horizon 2050 (environ 205 chercheurs). Un recrutement en moins par an provoquerait une diminution de la taille de la section à environ 175 chercheurs. Quatre recrutements annuels réduiraient la taille de la section d'un quart et trois recrutements en diviseraient les effectifs par deux.



La situation paraît encore plus critique pour les ITA où le faible nombre de recrutements au cours des 15 dernières années se traduit par une structure démographique vieillissante et

une réduction très rapide des effectifs à l'horizon de 10 ans dans les BAP J, D et F si le CNRS n'inverse pas la tendance.

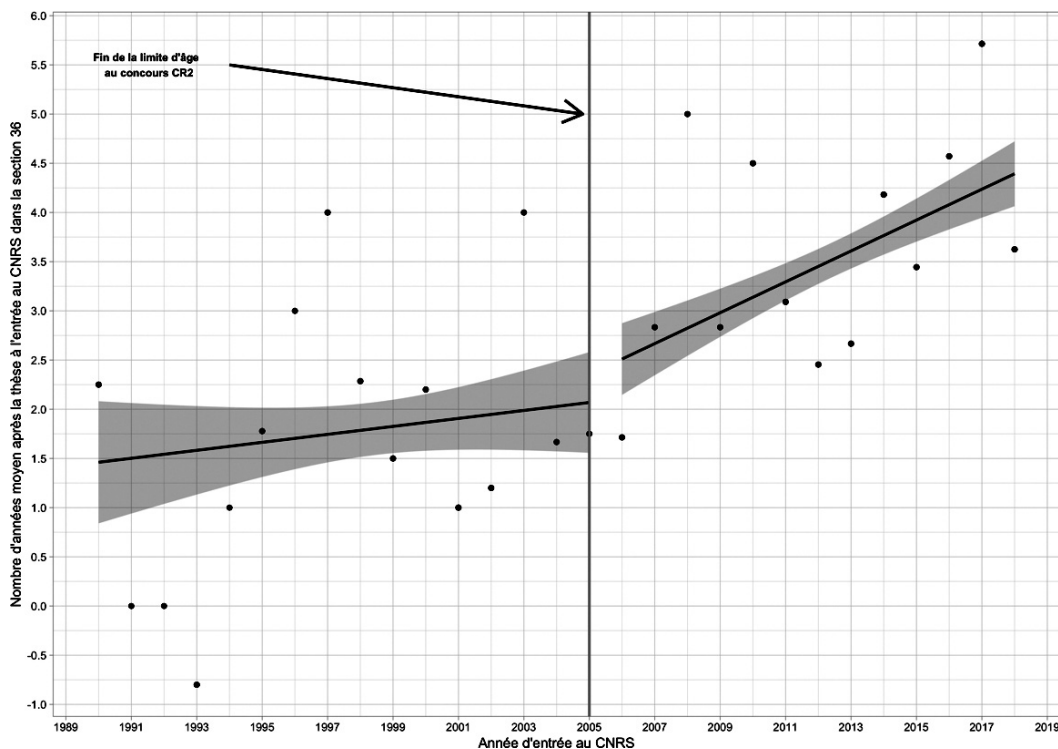
C. Bilan des recrutements et des promotions

1. Recrutements des chargés de recherche

Au cours de la présente mandature de la section 36, une moyenne d'environ 190 candidatures pour le concours CR ont été enregistrées chaque année pour une moyenne d'environ 6 postes mis au concours. La multiplication des post-doc avec la généralisation de la recherche sur contrat, combinée au tassement du nombre de postes statutaires mis au concours dans les universités et au CNRS depuis une décennie a contribué à augmenter considérablement le nombre d'excellents jeunes chercheurs à la recherche d'un poste stable.

L'indicateur le plus pertinent pour analyser les recrutements au CNRS est l'âge académique au recrutement, c'est-à-dire le nombre d'années qui séparent la soutenance de la thèse du recrutement. Le graphique ci-dessous

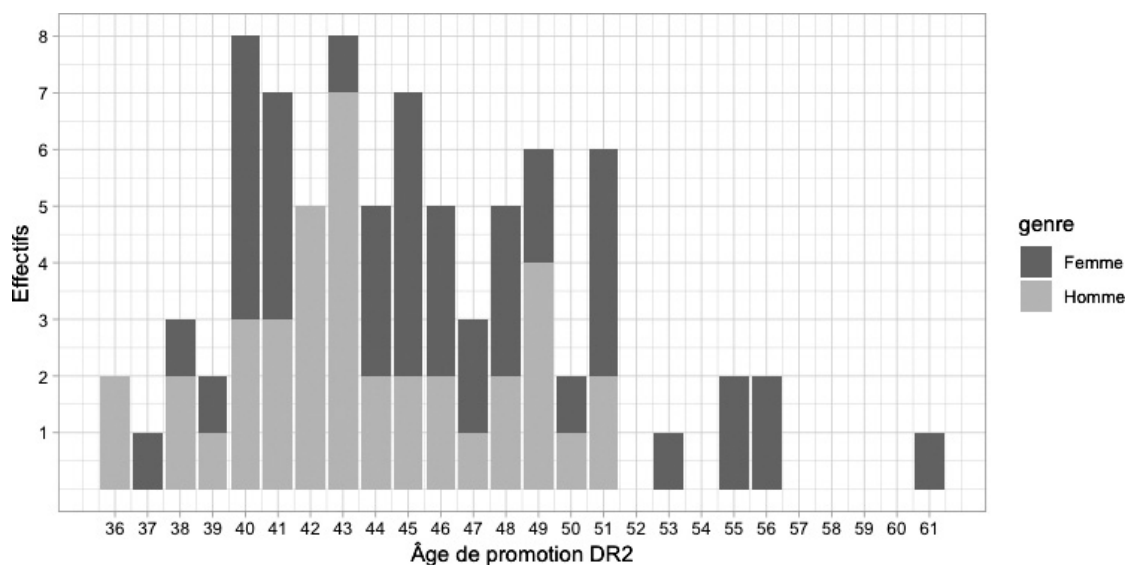
ajoute aux âges académiques moyens deux droites de régression expliquant l'âge au recrutement par l'année de recrutement avant et après les réformes de 2005 supprimant l'âge limite au concours CR2. Avant 2005, l'âge académique moyen au recrutement est stable, en moyenne autour de 1,8 ans. Autrement dit, avant 2005 la situation la plus courante était un recrutement au CNRS dans la section 36 un ou deux ans après la thèse. La réforme de 2005 provoque une rupture nette. Chaque année, l'âge académique moyen au recrutement augmente de près de deux mois. La modification du concours en 2018 (fin de la distinction CR2/CR1) a aussi contribué à la diversification des profils des candidats sur un même concours en termes d'âge académique, conduisant à une difficulté à mettre en équivalence des candidats brillants ayant soutenu leur thèse récemment et des candidats tout aussi brillants avec plusieurs années de post-doc à leur actif et un dossier de publication très consistant et diversifié.



Cette tendance envoie le signal que le recrutement dans la section 36 ne peut plus se faire qu'après une période de précarité de plusieurs années. Des effets de sélection peuvent en découler. Des recrutements de plus en plus tardifs ne vont-ils pas amener à recruter les docteurs qui ont des ressources suffisantes (familiales par exemple) pour faire face à de longues années de précarité et générer ainsi de nouvelles inégalités? Ou encore à privilégier les profils de thésards extrêmement dotés au détriment d'une variété de chercheurs au parcours plus originaux enrichissant la recherche? Cette situation produit également un risque pour l'égalité de genre compte tenu des dispositions différentielles à la mobilité, notamment internationale, les effets des congés de maternité et les arbitrages au sein des couples qui favorisent encore majoritairement les carrières des hommes.

2. Promotions DR

La promotion dans le corps des directeurs de recherche de 2^e classe est conditionnée par la soutenance de l'HDR. Les juristes soutiennent plus rapidement leur HDR après leur thèse (8 ans en moyenne pour les femmes et les hommes) que leurs collègues sociologues (11 ans pour les hommes et 15 ans pour les femmes). Le délai de promotion DR2 après l'obtention de l'HDR est cependant sensiblement plus long pour les juristes (8 ans pour les femmes contre 5 ans pour les hommes) que pour les sociologues (un peu moins de deux ans pour les femmes et un peu plus de deux ans pour les hommes). Les différences disciplinaires s'équilibrent en grande partie et l'âge moyen de promotion DR2 des juristes et des sociologues hommes converge autour de 43-45 ans.



La soutenance plus tardive de l'HDR des femmes sociologues décale l'âge moyen de leur promotion dans le corps des DR2 à 48 ans. Le passage de la 2^e à la 1^e classe intervient en moyenne une dizaine d'années en moyenne après l'entrée dans le corps de DR.

Au total, les décalages dans le déroulement de carrière entre hommes et femmes se traduisent par un accès plus tardif au grade de DR2 pour les femmes, ce qui explique en partie le *gender gap* en sociologie pour les DR1.

III. État des lieux scientifique

Il est bien difficile de restituer en quelques pages la richesse des travaux menés dans les unités relevant de la section 36 ; une présentation exhaustive n'est ni possible ni souhaitable, d'autant plus que la section regroupe quatre disciplines au sens du CNU (sections 1, 2, 3 et 19). La section a ainsi fait le choix d'insister sur quelques grandes thématiques et tendances récentes.

A. Méthodes

La sociologie et le droit partagent les méthodes de recherche avec d'autres sciences sociales. Si plusieurs laboratoires restent marqués par une forte identité théorique, thématique ou méthodologique et attirent de ce fait des chercheurs spécialisés, la section note avec intérêt le développement notamment chez les jeunes chercheurs de travaux associant plusieurs méthodes. On voit par exemple des chercheurs proposer une enquête ethnographique, tout en recourant également à des archives, des entretiens, et un travail prosopographique avec des méthodes quantitatives sophistiquées. On saluera ici la richesse de certaines enquêtes capables de donner à la fois un cadre statistique général, une contextualisation des objets dans leur historicité et de la « chair » sociologique grâce à des observations participantes de qualité, des entretiens panélisés, réitérés etc. Les compétences d'analyse quantitative en particulier se sont généralisées et sont montées en sophistication grâce à la formation dispensée au sein des UMR ou dans les écoles d'été ou formations comme Quantilille. Ainsi la majorité des laboratoires relevant de la section combinent des méthodes qualitatives et quantitatives et mènent une réflexion poussée sur les échelles d'analyse et le croisement des données et des sources. C'est par exemple le cas des travaux qui développent une réflexivité historique et sociologique sur les catégories des grandes bases de don-

nées internationales permettant à la fois de transformer ces catégories en objet d'étude et de parer aux risques du nominalisme en associant enquêtes qualitatives et quantitatives. La gamme méthodologique s'est également diversifiée en droit pour aller bien au-delà de l'analyse qualitative des corpus. Les juristes intègrent de plus en plus des techniques d'analyse lexicométrique, d'exploitation de sources numériques et données massives (voir infra), constituent des bases de données quantitatives sur les requérants, actes juridiques, ou encore recourent à des entretiens ou questionnaires.

La combinaison des méthodes est étroitement liée à l'ouverture disciplinaire que nombre de chercheurs de la section pratiquent, aussi bien avec des disciplines proches (science politique, ethnologie, histoire, philosophie, économie, géographie...), qu'avec des disciplines plus éloignées (sciences cognitives, neurologie, biologie...). Cette variété croissante de collaborations se traduit par un enrichissement des travaux et des méthodes de travail, comme par une diversification des objets de recherche.

B. Thèmes de recherche travaillés dans les UMR de la section 36

1. Stratification sociale et inégalités

Parmi les grandes thématiques de la section, celles de la stratification sociale, la production et la reproduction des inégalités restent centrales et ne cessent de se renouveler. Aussi bien dans les projets de recherche présentés au concours que dans l'activité de nombreux laboratoires, on peut souligner l'attrait de cette problématique dans ses déclinaisons diverses. Qu'il s'agisse de repenser la nomenclature des PCS, les comparer à l'échelle européenne ou de développer des enquêtes approfondies sur des groupes encore trop méconnus – comme les classes moyennes – les travaux questionnent les définitions, les

caractéristiques, les frontières sociales, les pratiques et les représentations constitutives des dynamiques sociales et politiques. Notons le remarquable essor de la sociologie des élites grâce aux développements d'enquêtes sur les pratiques politiques, culturelles, professionnelles, scolaires, financières voire familiales de différents sous-groupes des élites en France et à l'étranger. L'intérêt pour les classes populaires et leurs recompositions multiples ne se dément pas non plus, intégrant de plus en plus fréquemment des approches intersectionnelles mais aussi des problématiques encore relativement peu étudiées (rural / urbain, effets de génération...). Si les différents groupes sont donc étudiés avec acuité, les ségrégations et mobilités sociales ou spatiales font eux aussi l'objet de travaux novateurs s'intéressant aux diverses sphères de socialisation (familiales, scolaires, militantes, professionnelles...). L'ensemble de ces travaux, bien diffusés à l'international, conduit à proposer des lectures fines des ressources et des trajectoires des agents sociaux en combinant les méthodes, de plus en plus déployées sur des terrains à l'étranger ou dans des recherches comparatives.

2. Mondes marchands et travail

Le travail et l'économie – au sens large – continuent d'être des objets centraux pour les UMR de la section 36, mais on peut constater à la fois une diversification des objets et des collaborations interdisciplinaires entre juristes et sociologues ou avec des économistes, politistes et anthropologues. La diversification s'exprime d'abord dans les catégories de travailleurs qui sont enquêtées en France et à l'étranger, qu'il s'agisse d'une variation dans la position hiérarchique ou dans la division du travail. On peut noter dans cette perspective la poursuite d'un développement des travaux sur les personnels d'encadrement dans tous les secteurs (industrie, hôpital, médico-social, finance, administration, etc.) comme la multiplication de travaux sur des activités ou métiers spécifiquement contemporains (travailleurs des aéroports, des entrepôts, des grandes surfaces, de la sécurité, du nettoyage, des plate-

formes, etc.). Le travail est également saisi dans ses marges (travail précaire, travail au noir...) et dans ses frontières (travail bénévole et associatif, travail domestique...). Ces frontières ont fait l'objet d'un investissement particulier en droit du travail pour saisir les transformations des cadres normatifs et leurs appropriations à différentes échelles de régulation. Les recherches tiennent compte des propriétés sociales des travailleurs, de leurs trajectoires, rapports au politique, mobilisations, modes de vie et de consommation au croisement de sociologie du genre, des migrations, de la stratification sociale, des mobilisations, de la famille et de l'éducation.

Les analyses du monde économique portent également sur les institutions, qu'elles soient politiques, syndicales, juridiques (droit du travail et droit des affaires) ou économiques (entreprises, marchés). La sociologie du travail croise ici la sociologie de l'expertise, des élites, de l'action publique, du militantisme et des groupes d'intérêts ou du droit. Les institutions économiques, entreprises et marchés, donnent lieu à des travaux très dynamiques interrogeant notamment les mécanismes de fixation de la valeur des biens et les conditions rendant possibles les échanges. Ils mobilisent souvent des terrains à l'étranger, par la comparaison ou l'analyse des circulations des travailleurs, des dispositifs, des techniques, des productions, ainsi que les effets de diffusion de formes d'organisations, de conventions de mesures et de valorisation. En restituant finement, et avec une épaisseur empirique, les forces qui travaillent en profondeur nos sociétés contemporaines, ces travaux contribuent à éclairer et à rendre intelligibles des transformations qui sont peu ou pas appréhendées par le débat politique ou les sciences économiques.

3. Rapports sociaux de sexe

Dès les années 1970, des sociologues du CNRS ont publié des travaux pionniers sur le travail des femmes et les « rapports sociaux de sexe ». La démarche sociologique de dénaturalisation et d'analyse des hiérarchies sociales, portée par des chercheuses s'inscrivant dans

une perspective critique, a été centrale dans l'élaboration d'approches de genre aujourd'hui reconnues internationalement et encouragées dans de nombreuses disciplines scientifiques.

Les approches sociologiques peuvent être regroupées en deux pôles : les recherches qui ne prennent pas le genre pour objet principal, mais tentent de tirer parti de cette catégorie ou « variable » dans l'analyse ; celles qui portent principalement sur le genre, compris comme différenciation hiérarchisante socialement construite, à travers des objets variés. De nombreuses thématiques ont été développées par des membres de la section : sur le travail professionnel et domestique, de longue date, mais aussi par exemple sur la famille et le couple, plus récemment sur les violences sexuelles et les formes de lutte contre celles-ci, les migrations, le droit et la religion ou les pratiques et politiques de l'adoption et de procréation. D'autres thématiques émergent progressivement, par exemple les recherches sur la sexualité ou les masculinités.

Le genre est une thématique centrale pour plusieurs unités rattachées à la section 36. Il est à noter que dans le cadre du quinquennal débuté en 2019, trois unités de recherche ont créé des axes consacrés aux approches intersectionnelles, analysant l'articulation entre rapports de genre, de classe et de race. L'approche de genre émerge en droit pour compléter des perspectives développées en droit des religions, droits de l'homme, droit du travail ou droit de la famille.

4. Circulations internationales, migrations

Les recherches sur les migrations et circulations internationales connaissent un renouvellement depuis les années 1990 et un engouement qui se mesure au nombre croissant de thèses et de projets collectifs. La création de l'Institut Convergences Migrations ou encore la nouvelle chaire « Migrations et sociétés » au Collège de France attestent de cette dynamique scientifique en écho à leur centralité dans le débat politique en Europe. Aux

études classiques axées sur l'intégration des migrants se sont ajoutées de nouvelles perspectives dont l'ambition est d'inscrire les migrations dans un questionnement plus global sur les circulations internationales.

Une première approche rassemble les recherches qui questionnent et renouvellent les catégories classiques (les immigrés, l'intégration, l'origine, l'utilitarisme migratoire, etc.), les connaissances sur les routes migratoires (en interrogeant les formes de migrations autres que Sud-Nord) et les types et motivations des migrations. Une seconde approche rassemble les travaux sur les parcours et conditions d'accueil et d'installation des migrants « indésirables ». Ces derniers sont saisis en fonction de leur statut (réfugiés, sans-papiers, « mineurs isolés » etc.) et de leur genre, leurs origines nationales, ethniques ou religieuses effectives ou supposées (les domestiques, les travailleuses du *care*, les « Roms », les musulmans, etc.). Ces travaux s'intéressent aux mesures de contrôle des frontières, à leur militarisation et à leur externalisation dans des pays tiers. Ils traitent aussi des coûts du contournement de ces frontières en termes de vulnérabilisation juridique, sociale et économique dans les zones de transit ou de rétention à l'intérieur des frontières européennes comme à l'extérieur. Une troisième approche émergente s'intéresse aux processus d'ethnisation, de racialisation et à leurs effets en termes de discriminations et de domination. Les questions de la mesure du racisme, des discriminations et des rapports sociaux de race sont au centre de ces recherches. Ces travaux font l'objet de vifs débats épistémologiques, scientifiques, voire politiques. Ces approches qui se revendiquent ou sont classées dans les *Subaltern-Studies* ou les *postcolonial Studies* affichent ou revendiquent pour certaines l'ambition, au-delà du champ migratoire, de renouveler les catégories des sciences sociales.

5. Santé et environnement

L'environnement et la santé sont des thématiques transversales recouvrant un grand nombre de sujets qui nécessitent, presque par

définition, une approche interdisciplinaire. Les changements globaux (dérèglements climatiques, érosion de la biodiversité), nouveaux risques sanitaires, la transition énergétique, les nouvelles pratiques médicales, les rapports entre les hommes et le vivant, sont au cœur des activités de plusieurs UMR de la section 36.

Les sciences juridiques et la sociologie s'intéressent en particulier aux réponses politiques, sociales et juridiques ainsi qu'aux transformations de l'action publique et des usages et comportements face au nouveau contexte marqué à la fois par une urgence à agir mais aussi à une grande incertitude. La prégnance des questions environnementales engage une réflexion sur des concepts, les échelles temporelles et les valeurs des institutions et cadres de pensée, en droit (justice, démocratie, réparation, responsabilité, sanction...) comme en sociologie (participation, mobilisations, inégalités, conflictualités...). Les projets menés en droit ou en sociologie de la santé ont pour objectif commun d'éclairer les pratiques à l'aune des nouvelles techniques et des nouveaux territoires conquis par la médecine. L'étude de ces pratiques est réalisée tant à l'échelle individuelle que collective dans une dimension de santé publique, sans oublier les enjeux économiques considérables, aussi bien en termes de maîtrise des dépenses de santé que de profits industriels et la transformation du corps sain en capital. Les travaux émergents s'intéressent aux pratiques sociales, juridiques et éthiques se nouant dans le contexte des prises en charge innovantes (médicaments innovants, médecine génomique, médecine personnalisée).

Les travaux sur l'environnement ou la santé agissent depuis longtemps comme un terrain très fertile pour la sociologie des sciences et des risques portant sur l'analyse des controverses scientifiques, la mobilisation d'expertises ou encore l'analyse des lanceurs d'alerte ou processus de confinement ou de déconfinement des problèmes publics. Sur ces thématiques, les laboratoires affichent des approches interdisciplinaires SHS mais aussi, de plus en plus, avec des chercheurs en agronomie, biologie ou écologie ainsi que des acteurs du ter-

rain. Ces nouvelles collaborations soulèvent de nombreuses questions épistémologiques. La mobilisation des savoirs des sciences naturelles pose la question des conditions de leur usage en droit et en sociologie, et de leur hybridation avec celles-ci ou avec des savoirs profanes, dans l'exemple des sciences participatives.

6. Mobilisations, justice, violence

La section 36 regroupe des laboratoires ayant une riche tradition interdisciplinaire sur des objets au croisement du droit et de la sociologie portant sur la production et le maintien de l'ordre social, la déviance, la police, ou les droits de l'homme...) et la sociologie des mobilisations ou des violences. Ces travaux ont pu saisir un ensemble de transformations contemporaines dans une perspective interdisciplinaire, multi-méthodes et comparative. Des travaux importants ont ainsi été menés sur la sociologie pénale, les interactions normatives entre les échelles internationales, européennes et nationales, ou encore l'analyse statistique de la déviance grâce à la construction de bases de données à partir d'enquêtes ou du codage de sources judiciaires. Nourrissant le débat public et les nombreux observatoires, ces UMR ont mené des travaux cruciaux sur la transformation de la justice des mineurs, les prisons, aménagements de peine et récidives, la justice financière, la corruption ou encore les usages du droit international. Les instruments de mesure de la délinquance, le sentiment d'insécurité et l'analyse de la victimation, fondée sur l'exploitation des enquêtes internationales, nationales, régionales et locales constituent des faits marquants de ces dernières années.

L'analyse des politiques et des pratiques de sécurité à l'échelle des villes a été également beaucoup investie, surtout depuis 2015 en étudiant la sécurisation des espaces, la sécurité des transports publics, mais aussi les métiers et pratiques de la régulation des désordres. Certains chercheurs se sont saisis des mesures incitatives lancées suite aux attentats de 2015 pour saisir les logiques de production de la violence terroriste, mais aussi étudier les transformations politiques et leurs effets sur les pratiques

sociales. Ainsi, les rapports entre surveillance et technologies de gouvernement ont été particulièrement explorés que ce soit les technologies de surveillance discrète, la cybersécurité, les fichiers et de leurs usages, la vidéosurveillance.

7. Numérisation, données, objets connectés

Sous l'étiquette du « numérique », les travaux consacrés à l'analyse de la conception et des usages sociaux des technologies d'information et de communication ont connu un essor notable, appuyé par les soutiens institutionnels et appels à projets. Cela s'est traduit par un accroissement des recherches portant sur la place et les rôles de ces dispositifs, mais aussi sur la diversification des pratiques sociales désormais observées. Jusqu'à récemment, ces travaux se sont en premier lieu ancrés dans une série d'unités intéressées de longue date à la sociologie des sciences, des techniques et de l'innovation. En quelques années, les recherches empiriques se sont élargies à la mesure de la diffusion et des modes d'appropriation de ces objets au sein d'un vaste continuum de pratiques sociales. De la sociologie de la culture à la sociologie du travail en passant par la sociologie de la famille, de la santé ou la sociologie économique, rares sont désormais les domaines qui ne questionnent pas les reconfigurations articulées à la diffusion de ces technologies.

Un premier ensemble de travaux analyse les transformations des sociabilités liées au déploiement de dispositifs de mise en relation et de maintien des liens entre individus et groupes sociaux. L'analyse des pratiques amateurs, des communautés en ligne et des formes de circulation des contenus contribue à renouveler les travaux sur la consommation culturelle et les formes de sociabilité. D'autres travaux se sont concentrés sur les ressorts de la participation en ligne et sur les formes de mise en visibilité des actions humaines. Ces dernières années, un ensemble de chercheurs ont investi les plateformes numériques positionnées en nouveaux intermédiaires du travail ainsi que

l'étude de leurs dimensions juridiques. Aussi l'intérêt ancien pour l'ouverture des boîtes noires technologiques s'est-il renouvelé à travers l'étude des algorithmes, celle de la production et des usages des données numériques et des objets connectés, autant de domaines qui interrogent simultanément les promesses associées aux technologies et certains ressorts contemporains des inégalités sociales.

8. Nouvelles normativités et usages du droit

Si les juristes du CNRS sont peu nombreux par rapport aux enseignants-chercheurs, les UMR ont pu jouer un rôle primordial dans le développement d'approches interdisciplinaires en droit et ont contribué à faire émerger des problématiques innovantes en termes de méthodes (théorie, histoire, comparaison...) ou d'objets (justice, environnement, science, travail, santé, religion...). Ces thèmes ne correspondent pas, ou peu, aux découpages disciplinaires ou thématiques structurant les facultés de droit.

Parmi les nouvelles tendances repérables aussi bien dans les travaux des chercheurs que dans les projets des candidats aux concours, on notera la diversification des sources du droit et leurs interactions, le développement de nouveaux types de normativité et leur intrication avec des formes plus anciennes. De nombreuses études et projets soulignent ainsi le déclin du légicentrisme et du règne de la loi nationale au profit de normes internationales en pleine expansion avec lesquelles elles doivent se conjuguer. De même, les travaux analysent le développement de la *soft law* : brouillage des catégories, déformalisation des règles, effacement de la sanction, compétition ou renforcement des règles normatives avec des outils de gestion ou de gouvernement comme le *benchmarking* ou les instruments de gestion des conduites.

Les travaux sur les usages du droit connaissent également une nouvelle vigueur, qu'ils portent sur la mobilisation des règles comme ressources à l'action ou au phénomène du non-

recours aux droits, dont l'étude mériterait d'être exemplifiée, tout comme le droit de l'environnement, de la propriété intellectuelle ou des religions.

IV. L'internationalisation des unités de la section 36

En complément de l'interdisciplinarité, l'internationalisation fonctionne à tort ou à raison comme un impératif et une injonction omniprésente tant au CNRS que dans les universités. Elle se décline dans la volonté d'augmenter la proportion de chercheurs de nationalité étrangère, par la promotion des coopérations, contrats européens et internationaux, par la mobilité entrante et sortante ou encore par l'augmentation du taux de publication dans des revues « internationales », implicitement anglo-saxonnes. Si la section 36 est attentive à ces objectifs et indicateurs dans ses recrutements et promotions, elle défend une conception un élargie, plus sociologique et nuancée de l'internationalisation où la qualité et l'originalité d'une recherche n'est pas toujours synonyme de la capacité à publier dans des supports de publication anglo-saxonnes souvent fortement normées et « *mainstream* ».

Sur le plan des objets d'étude et des terrains, les UMR relevant de la section continuent de développer des recherches de pointe à la fois dans une perspective comparée (laboratoires en droit comparé, unités spécialisés sur les questions européennes, ou plus généralistes qui déploient des politiques volontaristes vers l'Asie ou l'Amérique Latine, par exemple) et dans une perspective plus monographique. Les UMR sont rarement fortement spécialisés sur une aire culturelle particulière, ce qui n'a pas empêché, au cours de la dernière décennie, le développement de projets très novateurs sur les circulations internationales des élites, experts, catégories et problèmes publics, ou encore de saisir les questions migratoires en

reliant terrains dans les pays d'émigration et dans les pays d'accueil. Saisis à la fois par les arènes de circulation internationale des idées et experts et de plus en plus « au ras du sol », dans les entreprises, dans les professions ou dans les familles, les unités de la section 36 ont contribué empiriquement à l'intelligibilité de la « globalisation ». Ce faisant, les unités ont densifié les collaborations internationales et ont participé à un nombre croissant de contrats de recherche et publications avec leurs homologues étrangers qui ne se limitent pas aux publications en langue anglaise.

Sociologiquement, cette tendance a été favorisée par un triple mouvement dans le parcours des chercheurs au CNRS. Premièrement, le recrutement à un moment plus tardif dans les carrières et la multiplication des contrats post-doc a sensiblement augmenté le pourcentage de candidats au concours ayant une expérience de recherche – et un réseau constitué – à l'étranger. En même temps, l'internationalisation croissante des formations a augmenté le nombre de candidats et lauréats du concours ayant réalisé au moins une partie de leur cursus de formation à l'étranger. C'est particulièrement le cas en droit, où d'excellents candidats, en particulier de l'Europe du Sud, ont réussi le concours CR au cours des cinq dernières années. Si l'ouverture internationale, mesurée par le nombre de lauréats d'origine étrangère ou le pourcentage de publications dans les revues « internationales » est quantitativement moins importante que dans des disciplines où une bonne maîtrise de la langue française n'est pas indispensable, l'augmentation est néanmoins une tendance de fond. On en observe une seconde. Bon nombre de chercheurs ayant commencé leur carrière sur des objets de recherche français parviennent à monter progressivement des réseaux de recherche à l'international ou dans des grandes enquêtes internationales. Ayant acquis leur notoriété scientifique sur un objet « français », ils étendent progressivement leurs champs d'investigations vers les projets et objets comparés. Enfin, ces mouvements de fond sont favorisés par le développement des aides à la traduction et à l'édition (encore trop limitées) et par la formation des jeunes chercheurs

à l'écriture scientifique à destination des publications internationales. Elle est aussi favorisée par la politique des délégations pour les enseignants-chercheurs, et plus largement par le soutien aux structures à l'étranger comme le Centre Marc Bloch, la Maison Française d'Oxford, les UMIFRE ou réseaux plus souples (GDRI ou LIA) auxquels bon nombre de chercheurs relevant de la section 36 participent.

La section 36 prend ainsi part à ce processus d'internationalisation, mais l'histoire des circulations des sciences a montré que ce n'est pas toujours en appropriant les paradigmes de la « science normale » internationale que le rayonnement international est le plus fort. Au contraire, c'est souvent la logique spécifique des champs scientifiques nationaux et les dialogues entre les champs dans la durée qui produisent un fort rayonnement des travaux et une capacité à peser sur les agendas de la recherche « internationale ».

V. Interdisciplinarité

L'interdisciplinarité est présente par nature dans une section qui regroupe la sociologie et les sciences juridique, mais elle va bien au delà. Une partie non négligeable des UMR relevant de la section 36 accueille des chercheurs en science politique, anthropologie, économie, philosophie, ou histoire, pour ne citer que les disciplines les plus fortement représentées. Si la cohabitation des disciplines n'est pas nécessairement synonyme de pratiques de recherche interdisciplinaires, elle facilite néanmoins une interconnaissance et une fertilisation croisée. Les GDR rattachés à la section 36 regroupent également, pour certains d'entre eux, des chercheurs de disciplines variées autour d'objets communs, que ce soit dans les SHS (GDR « Normes, sciences et techniques », GDR « Longévité et vieillissement ») et hors des SHS (GDR « Regards croisés interdisciplinaires sur le droit, la régulation et le savoir scientifique autour du changement climatique »).

Au cours des dernières années, la section 36 a accueilli le rattachement de chercheurs recrutés en CID. Sont principalement concernées la CID 52 (« Environnements sociétés : du fondamental à l'opérationnel ») et la CID 53 (« Méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques »). Parmi les chercheurs de la section 36, sept CR et trois DR ont un rattachement secondaire à l'une de ces CID. Cependant, une bonne proportion des recrutements depuis 2016 dans la section concerne des chercheurs travaillant à l'interface entre le droit ou la biologie/médecine, entre la sociologie et l'informatique ou encore interrogent l'usage des outils et algorithmes appliqués à la santé publique pour interroger les nouvelles pratiques médicales. Il est donc légitime de s'interroger, dans un contexte budgétaire difficile, s'il y a lieu à continuer à pérenniser des coopérations interdisciplinaires entre instituts du CNRS à travers les CID dans un contexte où le nombre, la qualité et la réussite des candidatures ayant un tel profil est pris en charge par la section 36.

VI. De l'utilité sociale de la sociologie et du droit

Les multiples évaluations auxquelles les membres du comité national participent montrent à l'évidence l'intense activité de conseils, expertises, et diffusion des savoirs vers le grand public que déploient les chercheurs de la section 36. Quel que soit le domaine de politique publique auquel on pense (politique scolaire, santé, sécurité, environnement, travail, immigration...) et les problématiques afférentes, les sociologues et les juristes de la section 36 sont constamment sollicités par le Parlement, les collectivités territoriales ou les ministères pour apporter leur expertise, alimenter les réflexions collectives, produire des analyses et des synthèses susceptibles d'éclairer les décideurs politiques et administratifs. Que ce soit dans le cadre de sollicitations directes, de recherche-actions, ou encore de la recherche plus ou moins appli-

quée, par exemple pour la Mission Droit et Justice, les membres des UMR de la section 36 déploient une énergie considérable à diffuser des points de vue informés par la recherche empirique. Cette activité qu'on peut qualifier d'expertise publique (voire de *public sociology* selon M. Burawoy) se double d'une présence non moins remarquable dans les médias – tous supports confondus, notamment presse écrite, radio et internet. Sans pouvoir être exhaustif, on notera les sollicitations des sociologues sur la loi travail, les phénomènes migratoires, les mouvements sociaux comme les Gilets Jaunes ou ce qu'il est convenu d'appeler les « radicalisations » ; en un mot chaque fois que le monde social cherche à y voir plus clair sur ce qui le travaille en profondeur (grèves ; souffrance au travail et risques psycho-sociaux, sanitaires ou environnementaux ; ségrégations ou discriminations ; violences urbaines ou domestiques...), on se tourne vers des sociologues ou des juristes. Les arènes d'intervention sont donc multiples mais notons que les auditions de sociologues à l'Assemblée nationale ou au Sénat, la participation active de nombre d'entre eux à des groupes d'experts, des observatoires, des commissions, des conseils scientifiques de toute nature font dorénavant partie intégrante du travail des chercheurs de la section 36. Cette capacité d'analyse des institutions, professions et dynamiques sociales peut également servir à renforcer les capacités réflexives du CNRS lui-même dans ses pratiques de recrutement, de promotion ou de gestion des ressources humaines. Loin d'être enfermés dans une quelconque tour d'ivoire, les sociologues et les juristes de la section 36 participent donc pleinement à la vie de la cité, contribuant ainsi à la vitalité de la vie démocratique et à la capacité réflexive de nos sociétés prises dans l'incertitude.

VII. Thèmes émergents

Ce rapport de conjoncture se termine par l'identification de thématiques de recherche que la section 36 voit émerger au sein des com-

munautés de recherche. Il ne s'agit aucunement de prétendre en donner une liste exhaustive, mais de souligner quelques thématiques et méthodes de recherche en développement.

1. La “révolution” numérique et les sciences sociales : Des *big data* aux savoirs

Comme toutes les autres disciplines, celles regroupées dans notre section sont affectées par les transformations dans le domaine du numérique. Sans naïveté face aux discours qui annonçaient soit une révolution scientifique, soit la fin de la science, elles ont saisi les opportunités qui se présentaient pour mieux décrire, expliquer et modéliser le monde social. En même temps, la “révolution numérique” a fortement impacté les relations sociales ; ces évolutions rapides posent à la fois de nouveaux défis de régulation normative (propriété intellectuelle, protection de droits fondamentaux...) et de nouveaux défis d'intelligibilité du monde social auxquels les sciences juridiques et la sociologie se doivent d'apporter des réponses. Forts de leur expérience, les sociologues et les juristes ont commencé à tirer profit de ces nouvelles sources tout en les croisant avec d'autres plus conventionnelles.

Nos disciplines ont aussi commencé à investir le terrain du numérique pour étudier les effets de la digitalisation du monde social sur nos comportements, par l'analyse des discours et des immenses masses de données disponibles. Les questions posées sont multiples : Comment les inégalités sont-elles transformées ou reconduites ? Que fait la dématérialisation des services publics aux usagers, et en particulier aux plus fragiles d'entre eux ? Quel cadre de travail, quelles revendications, quelle prévention sont mis en place quand les travailleurs sont en relation directe avec une application plutôt qu'entre eux ? Comment ce capitalisme de plateforme polarise-t-il la structure du marché du travail ?

2. Justice et algorithmes

Dès le milieu des années 1970, le CNRS a joué un rôle moteur dans le développement du

thème du droit et de l'informatique. Deux thématiques principales ont alors fait l'objet d'investigations : d'une part, la possibilité de créer des systèmes simulant la décision de justice et, d'autre part, l'incidence de la dématérialisation sur le fonctionnement de la justice. En parallèle, des travaux plus proches de la sociologie du droit et de la sociologie des techniques ont été consacrés à l'incidence de l'utilisation de techniques numériques sur le déroulement du procès. La thématique des rapports entre justice et numérique connaît aujourd'hui un important renouvellement, sous l'influence du développement de l'*open data* et de l'intelligence artificielle. La loi de 2016 Pour une République numérique impose la mise à disposition des décisions de justice. La perspective d'un accès à l'ensemble des décisions de justice ouvre la voie à un traitement de ces masses de données : comment construire des algorithmes capables d'extraire et de discerner les informations pertinentes à partir de larges bases de décisions de justice ? Comment concilier l'utilisation d'outils de justice dite prédictive avec les principes de non-discrimination et d'accès à la justice ?

3. L'intelligence artificielle : de la production de données à celle des sociétés

Les mêmes enjeux valent pour le développement de l'intelligence artificielle. Ces techniques intéressent et interrogent les chercheurs de la section à plusieurs titres. Comme dans toutes les autres disciplines, les chercheurs de notre section mènent des travaux qui cherchent à intégrer et à positionner le *machine learning* par rapport aux savoirs classiques.

Les algorithmes peuvent en effet être mobilisés pour extraire des informations de vastes corpus. Comment mesurer la place respective des hommes et des femmes au cinéma ? Un projet de recherche, qui s'appuie sur des techniques de *computer vision* (un sous-champ de l'intelligence artificielle) cherche à répondre à cette question en étiquetant des milliers de films depuis les années 1950. Dans quelle mesure le journalisme politique a-t-il adopté la langue des élus qu'il devait décrire ? Un

projet en cours déploie des technologies récentes (*sequence labeling*) pour analyser les évolutions de la langue politique contemporaine. De même, le développement des crypto-monnaies marque un déplacement de la souveraineté étatique vers une décentralisation de l'émission monétaire. La technologie de la chaîne de blocs (*blockchain*) est également utilisée pour sécuriser des transactions contractuelles (*smart contracts*).

L'apport des sciences juridiques est ici essentiel en investissant un domaine où la régulation est en train d'être inventée, dans un contexte de concurrence entre pays et d'innovation technologique permanente. En cas de défaillance, comment attribuer la responsabilité d'une voiture sans pilote ? Qui est responsable pour la discrimination réalisée par un algorithme, son concepteur ou les humains qui l'ont entraîné ? Le savoir produit est essentiel pour éclairer le législateur comme les acteurs privés. Des biais des algorithmes aux reconfigurations urbaines et sociales, de l'intime au capitalisme, des mobilisations aux inégalités : les travaux des chercheurs de la section 36 permettent de comprendre comment les méthodes algorithmiques affectent en profondeur nos sociétés et constituent de ce fait un vaste chantier amené à se développer.

4. Radicalisations et violence politique

C'est sans doute l'une des thématiques émergentes les plus évidentes et sur lesquelles, à l'initiative notamment du précédent PDG du CNRS Alain Fuchs, la sociologie a contribué à la réflexion collective. En refusant d'emprunter certaines grandes artères médiatiques et sans céder aux facilités de l'essayisme, certaines recherches sociologiques conduisent à problématiser cette question. En travaillant le terme pour mieux le définir, en enquêtant finement sur des trajectoires et des processus, en tentant d'analyser divers types de positionnements politiques sous cet angle, la sociologie permet de dénaturer, de contextualiser et *in fine* de déconstruire une catégorie qui peut conduire à subsumer sous un même terme

des pratiques et des processus très différents. Plusieurs chercheurs proposant des enquêtes dans divers contextes nationaux voire transnationaux – enquêtes exigeantes tant du point de vue du temps que du point de vue méthodologique ou éthique. Il y a fort à parier que cette question gagnera encore en intensité dans les années à venir tant les inquiétudes liées au désenchantement démocratique ou aux diverses formes de « populismes » font dorénavant partie du paysage intellectuel. Sur tous ces sujets, la sociologie apporte un éclairage scientifique fait de données étayées et d'outils théoriques éprouvés qui rompent avec les prénotions qui ont aisément cours et obscurcissent voire hystérisent les débats.

5. Le travail et l'économie en mutation

Les transformations récentes de l'économie et du monde du travail suscitent de nouveaux travaux qui devraient encore se développer. Premièrement, beaucoup reste à faire pour comprendre les effets du développement du numérique, de l'économie dite de plateforme ou de tous les métiers accompagnant la digitalisation de l'économie. Il s'agit d'analyser le travail de conception des outils de l'IA comme les effets de l'IA sur les métiers et organisations de travail. Deuxièmement, les analyses de la financiarisation contemporaine doivent être davantage étudiées, y compris dans la compréhension des résistances et alternatives à cette rationalisation du monde vécu. Troisièmement, les transformations juridiques du travail et des marchés sont de plus en plus marquées par une hybridation du droit du travail, de la concurrence, droit fiscal, directives européennes sur le marché du travail, responsabilité sociale et environnementale des entreprises dont les effets sur la hiérarchie des normes et les usages et les appropriations devraient être mieux pris en compte. Enfin, l'analyse des transformations démographiques des travailleurs et de la population produit des effets qui sont déjà d'une actualité sociétale et politique importante où les juristes et sociologues de la section auront un rôle important d'expertise et d'alimentation du débat public

à jouer à partir de travaux empiriques solides : migrations, vieillissement, féminisation, croissance de la dépendance et du travail de « care ».

6. Conservation de la diversité biologique et développement durable

Dans le contexte de la protection de l'environnement, deux volets font l'objet d'une intervention juridique particulière : le changement climatique et la biodiversité. La diversité biologique est souvent reléguée au second rang des préoccupations environnementales, derrière la question du changement climatique. Pourtant l'urgence du premier sujet n'est pas moindre. La prise en compte de la dégradation de la biodiversité engage à envisager plusieurs questionnements. Du point de vue de la philosophie du droit : quelle est la valeur juridique reconnue à la biodiversité et sur quelles considérations éthiques reposent-elles dans un contexte où le droit se fonde largement sur des instruments économiques? D'un point de vue plus pratique : quels sont les instruments juridiques de l'action publique disponibles (instruments basés sur des marchés, protection de la propriété intellectuelle, mode d'action privés)? Du point de vue de l'histoire du droit : comment est-on passé d'une protection par liste de la biodiversité remarquable par espèces, puis par habitats, à la prise en compte des continuités et fonctionnalités écologiques? Quelles controverses, contradictions et conflits d'usage émergent entre les différents enjeux environnementaux et instruments mis en œuvre? Ces différents instruments, mais aussi ceux qui émanent d'acteurs associatifs ou marchands, ont-ils une influence sur les représentations, les pratiques quotidiennes et les modes de vie?

Conclusion

Ce rapport de conjoncture montre de façon claire la dynamique des unités de recherche rattachées à la section et leur capacité à la

fois à se saisir de nouveaux outils méthodologiques, à investir des sujets émergents et à revisiter des objets classiques du droit et de la sociologie avec une palette élargie d'approches et de méthodes. Si la contraction des postes statutaires ouverts au concours CNRS et dans les universités renforce le risque d'un repli disciplinaire dans les logiques de recrutement, force est de constater que les environnements intellectuels pluridisciplinaires des UMR et les thématiques de recherche en effervescence comme le numérique, l'environnement, la santé, les transformations du monde du travail ou les migrations ont contribué à renforcer les approches interdisciplinaires nécessaires pour relever les défis scientifiques qui se posent. Ce rapport met également en lumière la participation très active des membres des UMR de la section dans la diffusion des connaissances vers l'espace public et les milieux décisionnels. Dans un contexte marqué par une accélération des cycles d'information, la multiplication des canaux de diffusion d'informations (et de désinformations) et une certaine illisibilité des grands mouvements qui affectent nos sociétés, les contributions des sociologues et juristes, s'appuyant sur des enquêtes méthodologiquement robustes, est plus nécessaire que jamais. Or, le maintien de la capacité des UMR à apporter des réponses pertinentes, robustes et réflexives à ce qu'on appelle par convention « la demande sociale » dépend de plusieurs facteurs que le présent rapport a cherché à mettre en exergue.

Tout d'abord, si les appels à projets et « coloriage de postes » sur des sujets appliqués, pointus ou orientés vers les « grands défis sociétaux » ont leur utilité, les grandes innovations théoriques ou conceptuelles ne se laissent pas planifier. C'est précisément la diversité des talents, approches et savoir-faire méthodologiques présents dans les UMR qui permet aux sociologues et juristes de s'emparer de sujets émergents non encore identifiés ou de forger des collaborations interdisciplinaires nouvelles pour relever les défis de la complexité.

Deuxièmement, la production de connaissances robustes, tout comme le développement de collaborations interdisciplinaires et l'innova-

tion nécessite du temps et de la stabilité. *A contrario*, la multiplication des contrats précaires et la réduction du nombre de postes statutaires conduit non seulement au sous-emploi et au chômage d'une génération de jeunes chercheurs extrêmement créatifs et talentueux, mais aussi à une instabilité peu propice à l'émergence de nouvelles approches et collaborations.

Troisièmement, la recherche contractuelle thématifiée et généralisée et la baisse relative des dotations constitue non seulement un gâchis de temps (il faudrait un jour chiffrer le temps de recherche perdu dans le montage et l'évaluation des projets avec un taux de succès parfois inférieur à 10 %), mais rend plus difficile l'expérimentation et l'exploration de nouvelles pistes. Réduire la dépendance vis-à-vis de la recherche contractuelle en augmentant les dotations permettrait de dégager un temps de recherche conséquent, mais aussi d'accroître les capacités d'innovation et la cohérence des recherches menées au sein des UMR.

Enfin et pour conclure, malgré leur grand dynamisme, leur internationalisation et leurs avancées interdisciplinaires, les UMR de la section 36 sont confrontés à un inquiétante dévitalisation des moyens humains. En effet, la perte de presque 30 % des chercheurs depuis le début des années 2000, le faible nombre d'ITA, particulièrement dans les BAP D et F et la structure démographique vieillissante, représentent une fragilisation pour les deux disciplines de la section 36 dans leur ensemble et menacent le maintien des UMR de sociologie en province tout comme celui des UMR à dominante juridique, UMR qui jouent un rôle primordial dans le développement de nombreux domaines peu pris en charge par les facultés de droit et les EA en droit. Un minimum de 6 postes ouverts au concours CNRS par an, une politique d'affectation des lauréats volontariste et un effort considérable pour le recrutement de personnels de soutien à la recherche paraît indispensable pour permettre aux UMR sur l'ensemble du territoire, de relever les défis de la production robuste de connaissances dans une société de plus en plus complexe et éviter un décrochage international sur les thématiques et méthodologies innovantes.

SECTION 37

ÉCONOMIE ET GESTION

Composition de la section

Claude DIEBOLT (président de section), Vincent MERLIN (secrétaire scientifique), Luc ARRONDEL, Catherine BOBTSCHEFF, Ai-Thu DANG, Sébastien DAVID, Nicolas DEBARSY, Nathalie ETCHART VINCENT, Alban FOURNIER, Cecilia GARCIA-PENALOSA, Raphaël GIRAUD, Fanny HENRIET, Oliver L'HARIDON, Yves LEVANT, Jonathan MAURICE, Mai-Anh NGO, Béatrice PARGUEL, Béatrice REY-FOURNIER, Antoine TERRACOL, Dominique TORRE.

Résumé

Le rapport de conjoncture de la Section 37 – Économie et Gestion – du CNRS est le fruit d'une enquête réalisée auprès des Unités de Recherche relevant de son périmètre scientifique. Ce choix n'est pas anodin. Il vise à proposer un regard éclairé, nourri des expériences et des intuitions propres à notre communauté scientifique. Nécessairement synthétique et réducteur, ce rapport tient compte des contingences du passé (institutionnelles, financières et humaines), déjà pointées dans plusieurs rapports de conjoncture précédents. Il porte sur les UMR, ces organes vitaux en charge de la production de la connaissance en France. Ce faisant, il traite des principales thématiques de recherche et retranscrit la perception des UMR quant au rôle du CNRS dans le paysage de la recherche internationale en économie et en gestion. Il vise à suggérer des pistes de réflexion sur l'évolution de la recherche en économie-gestion au niveau hexagonal et

mondial pour les prochaines années. Il met en lumière les forces et les faiblesses de la recherche publique française dans ce contexte, les principaux enjeux et les moyens d'y faire face. Les thématiques montantes, descendantes, orphelines et émergentes en économie-gestion, positionnées selon les orientations stratégiques affichées par l'Institut des Sciences Humaines et Sociales (InSHS) du CNRS y sont également analysées : modélisation/quantification, internationalisation, genre et études aérales.

Introduction

L'année 2019 marque le 80^e anniversaire du CNRS. Ce rapport de conjoncture s'inscrit dans cette dynamique.

Au cours des décennies passées, la recherche en économie et en gestion au CNRS a connu de nombreuses transformations, une mutation pour certains, un changement de paradigme pour d'autres, une internationalisation, une professionnalisation et une entrée revendiquée dans l'interdisciplinarité en tout état de cause. Ce rapport fait le constat que cette lame de fond a eu des répercussions majeures, plus ou moins bénéfiques, pour la recherche et les unités de recherche relevant de la Section 37 du CNRS.

La démographie de la Section 37, par exemple, se caractérise par une baisse régulière du nombre de ses chercheurs. Le Bilan Social 2017 du CNRS dénombre ainsi 168 chercheurs permanents, contre 207 au début des années 2000, ce qui représente une baisse de 19% de son effectif sur la période considérée. En termes de parité, l'effectif de chercheurs affiche 31,5% de femmes en 2017, avec une proportion de 41% en Chargés de Recherche et 22,9% en Directeurs de Recherche. L'âge moyen des chercheurs est de 46,6 ans. 22% des chercheurs ont plus de 55 ans.

Malgré une démographie peu rassurante, l'économie et la gestion au CNRS ont su pérenniser une véritable trajectoire internationale de leur activité. Au niveau des productions scientifiques tout d'abord, mais également au niveau du marché du travail. En ce qui concerne les productions scientifiques, les travaux de recherche français sont généralement (mais pas exclusivement) rédigés en langue anglaise et à ce titre font désormais partie intégrante de l'espace de la production internationale en économie et en gestion, et ce tant au niveau européen qu'à l'échelle mondiale. Les séjours à l'étranger, la participation à des colloques ou encore les co-publications témoignent également, à leur manière, d'une dynamique internationale de premier plan.

À l'instar des productions scientifiques, le marché du travail français de la recherche en économie et en gestion poursuit son parcours vers une internationalisation croissante. Qui plus est, de nombreux chercheurs français optent désormais pour des mobilités plus ou moins longues à l'étranger, voire pour des car-

rières dans des universités ou des organismes scientifiques étrangers. Pour ce qui est des doctorants, il apparaît que, en économie au moins, un séjour postdoctoral à l'étranger s'impose telle une norme avant toute candidature sur un emploi stable en France et/ou à l'étranger. De même, la fréquentation des « jobs markets » internationaux en économie devient également un « must » pour intégrer durablement la discipline. De façon symétrique, les laboratoires français accueillent de plus en plus de post-doctorants étrangers, mais aussi des professeurs et des chercheurs invités. La Section 37 note par ailleurs un nombre de plus en plus important (de l'ordre d'un tiers) de candidatures étrangères et de recrutements de jeunes chercheurs étrangers sur les postes de chargés de recherche mis au concours.

Sur le plan institutionnel, l'économie et la gestion au CNRS demeurent tributaires des choix et des contraintes budgétaires du passé. Si ces derniers ne sont pas spécifiques à l'économie ou à la gestion, ils contribuent toutefois à modifier en profondeur le paysage de la recherche. Ces choix participent, à leur manière, à l'asymétrie qui caractérise le paysage national de la recherche en économie-gestion et au phénomène, déjà soulevé par la mandature précédente, des « UMR en péril démographique » de chercheurs CNRS.

Par voie de conséquence, le marché du travail est désormais particulièrement concurrentiel et ceci tant sur le plan international que sur le plan national. Outre la mise en place de partenariats public-privé, la capacité à « attirer » et « garder » les meilleurs potentiels est devenue le mot d'ordre dans les laboratoires relevant de la Section 37. Cette concurrence s'accompagne de plus en plus souvent de la nécessité de proposer des conditions salariales qui soient compétitives au regard de celles qui ont notamment cours dans les universités anglo-saxonnes. Elle s'exprime également chez les chercheurs et enseignants-chercheurs en poste, chez qui elle justifie la recherche de plus en plus courante de compléments de revenus face à un risque évoqué de fuite des cerveaux. Ces cumuls de revenus peuvent relever d'une démarche individuelle, via l'affiliation

complémentaire à une école de commerce, la prise de poste dans une université étrangère ou une activité de consulting notamment. Ils peuvent aussi prendre une forme plus institutionnalisée, comme l'attribution de compléments salariaux systématiques dans certains grands pôles de recherche, notamment ceux adossés aux grandes écoles de commerce ou d'ingénieurs.

Les sciences de gestion participent, avec les sciences économiques, au secteur disciplinaire de la section 37 du CNRS, alors qu'elles relèvent d'une section CNU distincte. Plus que jamais sans doute, une réflexion quant à la place des sciences de gestion au CNRS s'impose, au vu de la faible proportion de gestionnaires, candidats et recrutés, parmi les chargés de recherche CNRS au cours des dernières années (une seule gestionnaire recrutée lors de la mandature en cours, trois sur les six derniers concours). Comme l'économie, les sciences de gestion rassemblent des travaux relatifs à des thématiques variées, fondés sur une pluralité d'approches et de méthodes, aux finalités et aux implications multiples (théoriques, sociétales, managériales, méthodologiques). Tout comme pour les approches non-standard en économie, il paraît difficile d'évaluer de la même manière l'ensemble de ces approches, sans pour autant n'en pénaliser aucune. Enfin, les travaux de gestion conduits dans les UMR CNRS présentent des spécificités par rapport à ceux menés dans les écoles de commerce : parce qu'elles sont davantage tributaires des classements internationaux, ces dernières sont également davantage susceptibles de privilégier des travaux à publication rapide, au détriment de démarches de plus long terme telles que celles fondées sur des enquêtes de terrain approfondies, la construction de bases de données originales, le recours à des méthodes qualitatives, la pratique d'une interdisciplinarité intégrant les autres humaines et sciences sociales et/ou les sciences exactes.

Conscients de cette diversité de contextes et d'approches au sein de la section 37, il nous a paru essentiel de prendre appui sur ces acteurs majeurs de la recherche française en économie et en gestion que sont les Unités Mixtes de

Recherche (UMR) pour construire le présent rapport de conjoncture. Nous avons ainsi élaboré et adressé un questionnaire aux 31 UMR relevant à titre principal et secondaire de la Section 37. Nous en avons réceptionné 21. Notons ici que les spécificités historiques, géographiques, institutionnelles et thématiques propres à chaque UMR ont rendu le travail de généralisation et de synthèse certes stimulant, mais également délicat. Ainsi, ce rapport de conjoncture présente les principales thématiques de recherche et retranscrit la perception qu'ont les UMR du rôle du CNRS dans le paysage de la recherche internationale en économie et en gestion. Il vise à suggérer des pistes de réflexion sur l'évolution du paysage de la recherche en économie-gestion au niveau national et mondial pour les prochaines années, les forces et les faiblesses de la recherche publique française dans ce contexte, les principaux enjeux et moyens d'y faire face, et enfin les thématiques montantes, descendantes, orphelines et émergentes en économie-gestion.

I. Les Unités Mixtes de Recherche

Notre échantillon révèle que le nombre de chercheurs CNRS (Chargés de Recherche et Directeurs de Recherche, émérites inclus) par unité varie de 0 à 15, avec une moyenne légèrement supérieure à 5. Huit UMR ont moins de 5 chercheurs CNRS. Une seule unité n'a pas de chercheur CNRS. La concentration des chercheurs en région parisienne et l'attractivité des unités de recherche franciliennes demeurent importantes mais, à ce jour, ne met pas (encore) en péril la présence de laboratoires de renom en province (Bordeaux, Lyon, Marseille, Rennes, Strasbourg, Toulouse...). Quant au ratio « effectif total des chercheurs CNRS rapporté à l'effectif total des chercheurs et enseignants-chercheurs », il est inférieur à 2% dans notre échantillon. Il culmine cependant autour de 17-18% dans les 3 unités qui totali-

sent le plus de chercheurs CNRS dans leur effectif.

Dans notre échantillon, le nombre d'ITA CNRS est quant à lui fortement corrélé au nombre de chercheurs CNRS présents. La moyenne est de 4 ITA par unité, mais ce chiffre varie entre 1 et 10 selon les unités. Enfin, le nombre de doctorants par unité varie de 19 à 122, avec une moyenne de 71 (calculée uniquement à partir des informations fournies par les 17 unités qui ont renseigné cet item). Au sein de notre échantillon, 14 UMR couvrent des thématiques relevant uniquement du champ de l'économie, tandis que les autres UMR développent des activités dans les deux champs de spécialité (économie et gestion) et que certaines y associent également des thématiques relevant du droit, de la sociologie, des sciences politiques, de la philosophie ou encore des sciences de l'information. En somme, il est frappant de constater à quel point les UMR soutenues par le CNRS en économie-gestion se trouvent dans des situations contrastées. Il n'existe pas un seul modèle d'UMR, ni même un nombre réduit de modèles d'UMR : c'est la singularité qui domine, conséquence de l'histoire spécifique de chacune d'entre elles et/ou d'un environnement géographique et institutionnel propre.

Au-delà de leurs spécificités, les UMR de la section 37 ont pour caractéristique commune d'être organisées scientifiquement autour d'axes de recherche. Partant de ces axes, nous avons cherché à identifier les principaux mots-clés qui y sont associés, puis nous avons procédé à des regroupements qui ont abouti à la caractérisation de 8 grands champs thématiques. Ces thématiques sont les suivantes (par ordre alphabétique) : Comportements et Décision ; Économie Publique ; Environnement, Espace et Développement Durable ; Histoire et Philosophie ; Innovation ; Macroéconomie, Économie Internationale et Économie du Développement ; Monnaie, Banque et Finance ; Organisations. Chacune de ces thématiques rassemble des approches plurielles et des méthodes qui vont des plus quantitatives et formalisées (modélisation, économétrie) aux plus qualitatives (enquêtes, entretiens, archi-

ves), en passant par des approches expérimentales, institutionnalistes ou computationnelles.

A. Comportement et Décision

L'économie comportementale et la théorie de la décision constituent une thématique très importante de notre échantillon d'UMR. Elles figurent parmi les axes principaux depuis l'origine et continuent à être bien représentées grâce à une politique scientifique de recrutement conséquente dans ces laboratoires. L'analyse des comportements et des décisions entretient des liens privilégiés avec différents domaines en économie – non seulement avec l'économie expérimentale (via les expériences de laboratoire et de terrain), mais aussi avec l'économie publique (en lien avec les politiques environnementales notamment) et la théorie des jeux et du choix social. En outre, on peut souligner le rôle, transversal à l'ensemble de ces travaux, joué par la modélisation mathématique et la reconnaissance de formes élargies de rationalité. On notera également des liens naturels avec la gestion (et, plus particulièrement, avec l'étude du comportement du consommateur en marketing et la recherche opérationnelle), la psychologie, la psychophysiology, la sociologie, les neurosciences ou encore les sciences politiques.

Dans le domaine de l'économie expérimentale, les thèmes abordés relèvent, entre autres et sans exhaustivité, de l'économie du travail (genre et concurrence, incitations et effets de pairs, favoritisme), de la finance (comportements spéculatifs), de l'économie de la santé (préférences des patients, prise de décision, impact de la fatigue), de l'étude du design de marchés et de mécanismes (enchères, tarification, mécanismes d'appariement), de la neuro-économie (comportements pro- et anti-sociaux, émotions et apprentissage), de l'économie publique et du bien-être (fraude fiscale, tricherie, genèse des normes sociales), de l'étude des réseaux sociaux (transmission d'informations, influence) ou encore du marketing (promotion de modes de consommation

durables). On soulignera ici que plusieurs UMR sont reconnues comme faisant partie des laboratoires initiateurs de l'économie expérimentale en France et qu'elles disposent d'une véritable reconnaissance internationale.

Dans le domaine de la décision, les travaux menés en théorie de la décision proprement dite articulent contributions théoriques et empiriques (expérimentales notamment), tandis que d'autres travaux se consacrent aux applications de la décision à l'économie, à la finance et aux sciences sociales. Notons que plusieurs laboratoires du CNRS ont une réputation internationale incontestable dans ce champ.

Un autre domaine d'étude, connexe à la théorie de la décision et présent de manière importante dans plusieurs UMR, est celui de la théorie des jeux (coopératifs et stratégiques), des interactions et des réseaux. Ici encore, on trouve une grande variété de thèmes abordés, qui vont de l'analyse du rôle joué par l'information et la communication à la modélisation des comportements et des interactions économiques entre les agents, en passant par l'étude de la dynamique et de l'impact des réseaux économiques et sociaux sur les performances économiques. Là encore, les travaux théoriques s'articulent à des approches empiriques, en particulier expérimentales.

Fortement reliée à la théorie du choix social, l'analyse des comportements et de la décision a également pour objectifs le développement et l'application des résultats obtenus en théorie des jeux, en théorie des choix collectifs et en théorie du bien-être aux domaines de la santé et de l'organisation industrielle. De même, de nouvelles thématiques émergent en économie publique et en marketing, en lien avec des questions sociétales actuelles telles que les inégalités et les discriminations, l'environnement, la consommation, l'éducation et l'emploi, la santé.

Enfin, on soulignera le développement des outils algorithmiques liés à la décision : théorie algorithmique des jeux, théorie algorithmique de la décision et choix social computationnel. Ces nouvelles thématiques sont au croisement

de l'informatique, de l'économie et de la gestion. Elles témoignent, à leur manière, de l'interdisciplinarité croissante de la recherche en économie.

B. Économie Publique

L'économie publique développée au sein des UMR de notre échantillon se caractérise par son rapprochement avec ce que les anglo-saxons nomment *Political Economy* et qui consiste en une meilleure intégration des problématiques institutionnelles aux domaines d'études traditionnels tels que la fiscalité, la santé, l'éducation, les transports, les politiques urbaines, etc. L'économie publique moderne touche ainsi à la science politique, à l'histoire, au droit et elle est désormais marquée par une ouverture méthodologique croissante. Cette tendance s'est notamment matérialisée dans l'explosion au cours de la dernière décennie des travaux consacrés à l'évaluation des politiques publiques. Cette évolution engendre une réorientation des intérêts du champ vers des travaux de nature plus empirique, et crée également une interface forte entre la recherche académique et la décision publique. L'intérêt croissant pour les travaux de cette nature conduit, par ailleurs, à un renouvellement profond des méthodes d'investigation empirique elles-mêmes, à travers notamment la réalisation d'expériences de terrain. L'émergence des travaux d'évaluation des politiques publiques est une donnée forte et structurante de l'évolution de la recherche dans les laboratoires CNRS. Les UMR interrogées considèrent que la tradition française « quantitative et formalisée » constitue un avantage comparatif, pour peu qu'elle soit aussi mise au service de l'analyse empirique. Dans la mesure où il s'agit d'un domaine de plus en plus en prise avec l'actualité, l'accent mis depuis plusieurs années sur la recherche fondamentale dans les recrutements opérés par le CNRS est cité par les directeurs d'unité comme un élément de souplesse des programmes de recherche développés, favorable

à l'adaptation de ce champ de recherche aux évolutions sociétales.

C. Environnement, Espace et Développement Durable

Toutes les UMR relevant de la section 37 mènent des travaux sur ces thèmes, ce qui confirme la tendance évoquée dans les rapports de conjoncture passés. Plusieurs UMR placent un ou plusieurs de ces thèmes au centre de leur activité. Pour d'autres, ces thèmes (ou l'un d'entre eux) constituent un axe ou un sous-axe affiché. En économie, certaines UMR mènent depuis longtemps des recherches importantes en environnement, tandis que pour d'autres, en particulier les UMR de gestion, il s'agit de thèmes relativement nouveaux. Les approches sont très diverses : modèles mathématiques micro ou macroéconomiques, formels ou numériques, économétrie, modèles multi-agents appliqués à l'environnement, études de cas. Il en est de même des questions traitées : changement climatique (impacts, adaptation et atténuation) ; écosystèmes et biodiversité ; ressources renouvelables (eau, forêts, poissons...). Le même constat prévaut quant aux domaines géographiques abordés, qui vont du niveau mondial à celui du pays. Plusieurs UMR souhaitent investir davantage les thèmes de l'environnement et du développement durable, notamment dans le cadre de travaux interdisciplinaires menés conjointement avec des chercheurs en sciences de la nature, ainsi qu'en informatique, algorithmique ou mathématique appliquée, et/ou avec des chercheurs issus d'autres sciences humaines et sociales. Les unités travaillant sur la dimension spatiale soulignent leur volonté de s'intéresser davantage encore aux enjeux de la mobilité et des processus migratoires, et suggèrent elles aussi l'utilité d'un renforcement des projets interdisciplinaires dans leurs thématiques. À l'échelle internationale, le CNRS est placé de manière unique pour soutenir ces travaux interdisciplinaires, de par la qualité de sa recherche et sa couverture globale des disciplines.

D. Histoire et Philosophie

Cette thématique couvre des recherches à l'intersection entre les sciences économiques, les sciences de gestion et d'autres disciplines en sciences humaines et sociales. On peut distinguer trois sous-ensembles qui se recoupent : l'histoire économique et la *business history* (HE), l'histoire de la pensée économique et de gestion (HPE), et la philosophie économique (PE).

Du fait de leurs interactions à la fois avec la philosophie et l'histoire, l'histoire économique et l'histoire de la pensée économique sont au cœur de ce champ. Elles se caractérisent par la convergence et l'enrichissement croisé de deux formes de recherches. Les premières développent l'édition scientifique d'auteurs de référence. Les secondes mobilisent l'HPE pour situer et comprendre l'origine des travaux théoriques actuels et pour mieux penser leur ancrage historique et leurs présupposés. Quant à la philosophie économique, elle recouvre à la fois des interrogations de type épistémologique portant sur la méthodologie des sciences économiques (que ce soit en questionnant la nature et le rôle des modèles ou en discutant d'autres méthodes non exclusivement déductives et d'autres critères de validité par exemple) et des questionnements en lien avec les théories de la justice. En HPE, nous remarquons que le type de recherches menées en France dans les centres de recherche en économie relève, dans d'autres pays européens et nord-américains, plutôt des départements de philosophie ou de sciences politiques. En HE, la recherche en sciences économiques est désormais cliométrique, associant l'histoire, la théorie économique et les statistiques/l'économétrie. En science de gestion, l'HE est souvent proche de la *business history* avec un ancrage théorique et quantitatif moins prononcé. Ces thèmes de recherche sont présents de façon plus ou moins explicite dans la plupart des unités rattachées à la section 37. Ils le sont en tant qu'axe de recherche dans plus du tiers des unités analysées, parfois en lien étroit avec les questions de théorie économique.

E. Innovations

Quelles que soient leur taille, leur localisation, leur discipline de rattachement (économie ou gestion), toutes les UMR de notre échantillon utilisent dans la description de leurs axes structurants le terme *innovation*. Les laboratoires mettent en avant le fait qu'un renouvellement des problématiques a été rendu possible grâce à des investissements de nature méthodologique dans divers outils : théorie des jeux, théorie des réseaux, micro-économétrie sur données de firmes et de brevets, économie expérimentale, économie comportementale, économie de la complexité, etc.

La séparation entre des approches formalisées et normatives, plutôt positionnées sur des problématiques de concurrence imparfaite, et une économie industrielle « à la française » plus ancienne, descriptive et inductive, semble appartenir au passé. Au fil des ans, les fondements d'une économie industrielle moderne se sont enrichis, à la fois de nouvelles approches théoriques (néo-institutionnalisme, théorie des organisations, approches spatiales, externalités, réseaux, théorie de la connaissance, approches interactionnistes...) et de nouveaux outils méthodologiques (économétrie et économétrie spatiale, théorie des jeux, approches évolutionnistes, modèles multi-agents...). Ce sont désormais les acquis d'une communauté scientifique fortement internationalisée dans laquelle les chercheurs français sont de mieux en mieux intégrés. Par ailleurs, la recherche sur le thème apparaît transversale à l'économie et à la gestion (notamment en ce qui concerne la gouvernance d'entreprise et l'entrepreneuriat) ; c'est un domaine de recherche « ouvert » qui fait se confronter des approches différentes et qui s'enrichit de cette différence. Elle est bien aujourd'hui à l'interface d'un grand nombre de champs, tels que l'environnement, les comportements et décisions, les organisations et institutions, l'économie et le droit, l'économie géographique, les politiques économiques. Elle utilise des méthodes diverses mais complémentaires, qui permettent de

faire avancer la connaissance. Certains développements du champ (systèmes complexes, éconophysique) requièrent également une pluridisciplinarité, voire une interdisciplinarité, inter-Instituts (physique, informatique, écologie), donc au-delà des SHS.

F. Macroéconomie, Économie Internationale et du Développement

Les travaux en macroéconomie et économie internationale demeurent au cœur des travaux de nombreuses UMR. Le recours à des méthodes très diverses, comme l'économétrie (séries temporelles, données de panel, structurelles, spatiales), la modélisation, les techniques de simulation, la théorie des jeux, la modélisation dite DSGE (*Dynamic Stochastic General Equilibrium Models*) avec l'incorporation récente du secteur bancaire, l'utilisation croissante des modèles à base d'agents ou encore, notamment en économie du développement, les approches expérimentales et d'analyse d'impact, témoignent de la dynamique de ces champs thématiques.

Dans le domaine de l'analyse des fluctuations et de la croissance, les travaux intègrent de plus en plus les interdépendances macroéconomiques et financières afin de mieux comprendre les cycles économiques et financiers et d'étudier la transmission des cycles au sein des économies ouvertes et financiarisées. Une part croissante des recherches porte sur les impacts macroéconomiques des fluctuations des prix des matières premières et de l'énergie ; l'objectif étant de parvenir à une meilleure compréhension des mécanismes de transmission entre les différents déséquilibres macroéconomiques afin d'en déduire des recommandations en termes de politique économique. S'insérant dans une optique d'analyse des équilibres de long terme, des travaux se sont récemment orientés vers les questions de développement durable et de macroéconomie sous contrainte environnementale, ainsi que vers les enjeux

environnementaux des questions commerciales. Des approches pluridisciplinaires et interdisciplinaires sont ici fréquemment retenues, au travers de collaborations avec des biologistes, climatologues, mathématiciens, physiciens, psychologues et sociologues. Les travaux plus traditionnels en macroéconomie théorique sont naturellement poursuivis et approfondis, avec le souci accru de rendre la théorie plus réaliste en introduisant divers éléments comme les générations d'agents, les hétérogénéités entre agents, les contraintes de crédit, l'incomplétude des marchés ou encore les rigidités nominales. Les travaux dans le domaine de l'économie géographique et du commerce international occupent également une place centrale. Concernant l'économie géographique, les recherches ont trait à la localisation des activités économiques, à l'évaluation des effets d'agglomération et à celle des coûts de transport notamment. S'agissant du commerce international et de la mondialisation, les travaux portent sur des thèmes divers relatifs aussi bien à l'intégration des marchés et de la production, aux politiques commerciales (non tarifaires) et aux accords commerciaux régionaux ou globaux qu'aux liens entre commerce et sécurité internationale ou à la cohérence des politiques d'aide. Les recherches en économie du développement se caractérisent de plus en plus par une double dimension, macroéconomique et microéconomique à la fois. Les thèmes traités portent ainsi, notamment, sur la dynamique des inégalités, les migrations internationales et les questions associées (transferts de fonds des migrants et mobilité du travail par exemple), l'économie politique des institutions et du développement, les nouvelles formes d'intégration internationale des PED.

G. Monnaie, Banque, Finance

Ces thématiques de recherche sont traditionnellement très présentes au sein des UMR du CNRS. Les méthodologies à l'œuvre vont de l'économie mathématique et de l'économétrie

appliquée (dans le champ de la finance de marché notamment), à des approches plus institutionnelles, singulièrement en économie bancaire et en macroéconomie financière. La finance d'entreprise fait appel à ces mêmes compétences, mais elle recourt aussi aux méthodologies de l'analyse et de la gestion comptable et financière. L'économie expérimentale et la simulation numérique sont désormais de plus en plus sollicitées.

Le champ de la finance de marché est celui où la présence des publications issues de laboratoires du CNRS reste la plus forte au niveau international. Les préoccupations classiques de la finance théorique (détermination des prix d'actifs, choix de portefeuille, information, incertitude, *pricing* des produits dérivés, innovations financières...) sont toujours fortement représentées. Sollicités par l'actualité de la dernière décennie, des objets nouveaux apparaissent aussi davantage tournés vers les propriétés du marché ou de certains de ses segments (l'analyse des contextes d'illiquidité, du changement des microstructures, de la découverte des prix, des processus de contagion financière...). Le domaine de recherche relatif à l'économie bancaire connaît, lui aussi, une vigueur nouvelle liée aux crises récentes. Il se développe souvent dans des unités auparavant davantage tournées vers la macroéconomie financière ou l'analyse de la politique monétaire. Le risque de crédit, la titrisation, les régulations micro et macro-prudentielles en sont désormais les thèmes principaux, ce qui n'exclut pas le développement de travaux autour des enjeux de la liquidité bancaire et de la contagion des crises bancaires.

Les recherches en finance d'entreprise, quant à elles, s'intéressent à la gouvernance d'entreprise comme aux financements non-bancaires. En outre, en écho aux crises financières récentes, la structure de la dette continue de faire l'objet de nombreux travaux. Le champ de la macroéconomie financière, enfin, articule les différents éléments de l'activité monétaire et financière dans une analyse des composantes financières de la globalisation des économies. Les interdépendances entre marchés et institutions, entre économies nationales, entre sphères

res financière et réelle font ainsi l'objet d'une attention particulière. Enfin, les chercheurs s'efforcent également de mieux comprendre l'origine et la propagation des crises financières sur un plan macroéconomique et international.

H. Organisations

Cette thématique couvre l'ensemble des recherches en sciences de gestion, à l'exception de certaines spécificités propres à la finance et au marketing. Développées dans plusieurs UMR, ces recherches prennent différentes formes. Elles sont conduites au sein d'axes thématiques classiques tels que les ressources humaines, la comptabilité ou les systèmes d'information. En grande majorité, les unités pensent leurs travaux en termes d'axes transversaux : bien-être et santé au travail, management de l'innovation, gestion des connaissances et compétences collectives, dynamique des organisations et nouveaux modes de management, créativité organisationnelle et sociétale, gouvernance des nouvelles formes d'organisation, etc. Ces axes affichent souvent l'ambition d'un impact sociétal, à l'image du management de l'innovation (qui concerne notamment les usages d'Internet), des nouvelles formes organisationnelles (telles que les réseaux et l'entrepreneuriat), des nouvelles formes de relations marchés-organisations (qui soulèvent par exemple la question du type d'informations financières divulguées) ou de la gestion des risques. L'ensemble de ces axes affichent une forte interdisciplinarité, avec la sociologie et/ou la psychologie par exemple.

II. Le rôle du CNRS vu par les UMR

Les UMR rattachées à la section 37 considèrent que, dans le domaine des sciences économiques et des sciences de gestion, le CNRS

joue un rôle essentiel dans l'animation et la production de la recherche en France. C'est d'abord la qualité de ses chercheurs qui est plébiscitée. Leur capacité d'animation des UMR dont ils constituent un élément moteur est soulignée par l'ensemble des équipes, ne serait-ce que pour regretter leur faible nombre quand il s'agit d'équipes de petite taille ou aux effectifs déséquilibrés. Ces chercheurs constituent une véritable force de frappe de la recherche française : même si certains laboratoires regrettent de ne pas pouvoir participer de plus près à «leur» recrutement, personne ne conteste que le recrutement centralisé et de haut niveau dont ils font l'objet contribue à la haute qualité moyenne de leur effectif. Certains laboratoires déplorent des niveaux de rémunération insuffisants par rapport aux standards internationaux et susceptibles de conduire au départ de certains chercheurs. Ils estiment également que le temps passé en démarches administratives est trop important, qualifiant même certaines tâches (RIBAC, documents demandés pour les évaluations à vague et mi vague notamment) d'inutiles. Les possibilités de passages CR-DR2, puis DR2-DR1, et enfin DR1-DRCE sont quant à elles bien trop limitées, ce qui se traduit par un ratio DR/CR très défavorable, notamment relativement au ratio Prof/MCF. Une telle situation a pour conséquence à la fois de limiter l'attrait des carrières au CNRS et d'inciter des CR à basculer vers l'université comme professeur plutôt que de demander une promotion DR. Ceci représente donc une perte potentielle des meilleurs chercheurs pour le CNRS. Relativement à d'autres centres européens d'excellence, le CNRS est ainsi perçu comme insuffisamment attractif. Nombre de directeurs d'UMR soulignent l'existence d'un vivier (alimenté par les principales universités et grandes écoles françaises) de jeunes chercheurs très bien formés et, dès lors, regrettent le nombre bien trop faible de postes de recherche à plein temps offerts par le CNRS, organisme de recherche de pointe pourtant (assez) unique au monde.

Les ITA CNRS sont très appréciés dans les UMR, qui soulignent leurs compétences et leur professionnalisme. Dans de nombreux cas aussi, les laboratoires trouvent leur nombre insuffisant et se sentent handicapés par le

non-remplacement systématique des collègues faisant valoir leurs droits à la retraite. Ces moyens en diminution compliquent l'organisation des tâches et la gestion des ressources humaines au sein des unités. Aggravées par la lenteur démotivante des évolutions de carrière, ces fontes d'effectifs se soldent souvent par la perte de compétences essentielles dans les domaines de l'administration de la recherche et du soutien aux chercheurs.

L'aide financière du CNRS est appréciée comme complément à d'autres sources de financement, mais elle n'est pas toujours considérée comme essentielle : elle est parfois perçue comme modeste, voire dérisoire au regard des ressources totales et surtout des dépenses des équipes. Le label apporté par le CNRS est davantage apprécié, surtout en province, mais aussi chaque fois qu'une unité se trouve confrontée à la recherche de moyens complémentaires, candidate à des appels d'offres ou participe à d'autres confrontations avec des partenaires non labellisés. Ce label semble avoir moins d'importance sur le plan international où d'autres logiques priment.

La politique scientifique du CNRS n'est quasiment pas citée : quand elle l'est, c'est plutôt négativement. Si chacun semble s'accorder pour constater la faiblesse des orientations scientifiques données par le CNRS, il n'y a pas vraiment de consensus sur la forme que devrait prendre cette politique si elle s'affirmait plus clairement. Plusieurs thèmes ressortent, portés par des équipes aux caractéristiques différentes. Citons par exemple le souhait de voir le CNRS défendre davantage l'interdisciplinarité. Il pourrait s'agir par exemple de réunir en certains lieux des compétences différentes autour d'un objet, plutôt que de privilégier des configurations de laboratoires associant des compétences voisines, dans la recherche d'un renforcement des domaines de spécialisation. Certaines unités – parfois les mêmes – souhaiteraient voir le CNRS donner plus de moyens aux sciences de gestion. Dans d'autres cas, les laboratoires peuvent souhaiter une aide plus sélective aux unités susceptibles d'occuper les premiers rangs dans leur champ sur le plan européen et international. Les uns plaident

pour davantage de sélectivité (teintée d'élitisme) voire d'incitations financières, les autres pour moins de cloisonnement disciplinaire et davantage de pluralisme méthodologique.

Soulignée plus haut dans ce rapport, l'hétérogénéité des UMR a une incidence sur la perception du CNRS par les équipes. Les plus grosses unités trouvent souvent le CNRS trop centralisé ou bureaucratique dans ses procédures ; certaines voudraient choisir leurs chercheurs, maîtriser leur promotion et le niveau de leurs incitations. Les plus grosses unités regrettent parfois le saupoudrage des moyens quand les plus petites pointent au contraire du doigt la concentration de ces mêmes moyens dans un petit nombre d'équipes localisées dans de grands pôles de recherche parisiens ou provinciaux. Les provinciaux trouvent généralement que Paris draine l'essentiel des moyens, mais en réalité l'hétérogénéité existe autant entre UMR de Province qu'entre UMR franciliennes.

De manière générale, beaucoup d'UMR perçoivent le CNRS comme une agence de moyens plutôt que comme un opérateur de recherche. Quoi qu'il en soit, nombre de directeurs ou de directrices d'UMR considèrent que, via le CNRS, la recherche française s'est développée en qualité et en visibilité. Si les pratiques d'évaluation ont stimulé ce développement, elles ont aussi engendré des dérives : prime à certains types de travaux avec risque d'uniformisation, prime à la complexité, surenchère quantitative à la publication (duplication sans véritable innovation). En outre, la formation à la recherche souffre de véritables inégalités liées aux différences de moyens selon les laboratoires, en même temps que de déséquilibres thématiques. Depuis plusieurs années, on observe par exemple un « déficit » en docteurs spécialistes d'économétrie (théorique tout particulièrement). Par ailleurs une partie de la recherche française pâtit, soit de l'absence de données dans certains domaines, soit du manque de fiabilité des données existantes, soit enfin du désintérêt des supports de publication les plus prestigieux pour des recherches menées sur données françaises. Enfin, à un niveau plus systémique, la recherche française souffre d'une absence de reconnais-

sance dans les débats publics, et d'une faible audience auprès des décideurs politiques.

III. Quel avenir pour la recherche en économie et gestion au CNRS ?

Les directrices et directeurs d'UMR ont été interrogés sur leur vision de l'avenir de la recherche hexagonale en économie et en gestion. Leurs réponses sont étonnement unanimes compte tenu de la diversité thématique et institutionnelle de leurs unités.

Sur le plan institutionnel, tous s'accordent sur le fait que la recherche va poursuivre son mouvement d'internationalisation avec, à la clé, une mise en concurrence accrue des institutions aux niveaux national et international. Ils expriment leur inquiétude quant aux moyens dont disposeront à l'avenir les UMR pour rester compétitives. L'inquiétude porte également sur les conditions matérielles de la recherche en général : ampleur des charges administratives et d'enseignement des enseignants-chercheurs, complexité et lourdeur de l'administration de la recherche, réduction du nombre de postes de chercheurs, d'enseignants-chercheurs et d'ITA, niveau insuffisant des salaires et maigres perspectives d'évolution de carrière.

Sur le plan scientifique, deux défis se dégagent clairement. Le premier concerne la remise en cause du modèle classique de rationalité, avec la prise en compte des dimensions psychologiques, sociales et culturelles des acteurs, en économie comme en gestion. Le second concerne la nécessité de répondre à une demande sociale. Pour ce faire, la quasi-totalité des directrices et directeurs de laboratoires mettent en avant la nécessité d'une recherche interdisciplinaire, si ce n'est multidisciplinaire. Ils ne perçoivent pas de champ a priori régressif, c'est-à-dire de thématique descendante, voire orpheline, mais uniquement une nécessité de renouvellement général des différents

compartiments de la discipline. Ce faisant, l'idée de sciences économiques ou de gestion isolées semble, plus que jamais, devoir s'effacer au profit d'une ouverture sur les autres sciences humaines et sociales et exactes. L'évolution vers un renforcement systématique des approches empiriques/expérimentales semble ainsi être vouée à se poursuivre de manière forte. Le recours aux apports d'autres disciplines va lui aussi continuer à se développer. La question de la relation homme-nature va également prendre plus d'importance, avec des questionnements autour de l'économie de l'environnement, de la gestion des ressources naturelles, des liens entre environnement et développement, des questions climatiques.

La question des enjeux liés à l'internationalisation des activités économiques, qu'il s'agisse de leur impact au niveau local ou des enjeux de la montée des inégalités et de la redistribution, paraît également de plus en plus prégnante. L'arrivée en masse de grands pays comme la Chine et l'Inde nécessitera également de renouveler les stratégies de recherches aréales.

L'ouverture de la microéconomie aux autres sciences humaines et sociales est également un gage de renouveau. Irrigués par les apports de l'organisation industrielle, les travaux en économie et finance internationale se renouvellent. La macroéconomie et l'histoire économique cliométrique font l'objet d'un rebond important suite à l'intérêt et aux questionnements suscités par la crise de 2007 et ses prolongements. De manière générale, l'histoire retrouve une place de choix au sein de l'économie et de la gestion.

Le management des organisations et des hommes est également perçu comme une thématique toujours actuelle, tandis que l'intelligence artificielle et l'informatique cognitive sont vues comme des thématiques montantes. Toujours en gestion, les questions relatives à la responsabilité sociale des entreprises sont en forte croissance. La quantification prend également une place de plus en plus importante : pensons par exemple au marketing quantitatif, aux *big data*, à la recherche opérationnelle, qui emboîtent le pas de la finance.

Dans la perspective des orientations stratégiques affichées par l'InSHS, la modélisation/quantification englobe nombre de thématiques montantes. Parmi celles-ci, l'économétrie, et notamment l'économétrie financière, est amenée à se développer, en lien avec le développement des *big data* et de la « science ouverte ». Un point important à souligner à ce sujet est la question de la « répliquabilité » des travaux. Cette tendance est très positive, notamment parce qu'elle permet de donner toute leur crédibilité aux travaux quantitatifs effectués.

S'agissant de l'internationalisation, le champ de l'économie internationale (au sens large) est incontestablement amené à se développer, du fait notamment de l'intégration croissante des économies, des mutations à l'œuvre au niveau mondial et de leurs enjeux commerciaux, énergétiques, migratoires et financiers. De multiples domaines sont ainsi concernés, comme la macroéconomie internationale et la finance internationale (dont relèvent les phénomènes de contagion entre économies, générateurs de déséquilibres globaux), l'économie géographique (avec notamment la question des migrations et les tentations de retour aux frontières), le commerce international (face aux tentations protectionnistes notamment), l'économie de l'énergie et de l'environnement (dont relève la question de la transition énergétique par exemple), l'économie du droit et l'économie de la concurrence (dans un contexte de forte concurrence internationale à tous les niveaux), l'économie de la santé (concernée du fait des risques sanitaires notamment).

Enfin, en ce qui concerne la priorité donnée par le CNRS aux études de genre, le sujet est indéniablement une thématique importante et montante, à la fois en économie et en gestion, en particulier à travers les questions relatives aux inégalités et aux discriminations.

Les directrices et directeurs d'UMR notent, dans leur grande majorité, que répondre à l'ensemble de ces défis est rendu difficile par un manque de coordination entre les acteurs. La quasi-totalité des responsables d'UMR soulignent le rôle essentiel que peut et doit jouer le CNRS, en particulier dans la promotion de

l'interdisciplinarité. Loin de devoir se réduire à une agence de moyens, le CNRS est appelé à jouer un rôle structurant dans l'élaboration et la mise en œuvre d'une politique scientifique de long terme en collaboration avec les universités.

Conclusion

Ce rapport de conjoncture témoigne du dynamisme international de la recherche en économie-gestion en France, même si certaines difficultés relatives au recrutement, à la rémunération, à la gestion des carrières et au renouvellement des personnels, ainsi qu'aux financements et à la coordination des institutions, viennent parfois entraver l'énergie déployée par ses acteurs.

Les UMR sont les lieux privilégiés de la recherche en économie et en gestion. La remise en question de certains fondements de nos disciplines et la nécessité de pouvoir développer des programmes de recherche audacieux et innovants impose de recourir à des approches différentes (et complémentaires), voire à des méthodes issues d'autres champs disciplinaires. Le cloisonnement de nos disciplines selon des thématiques plus ou moins étanches est, pour l'essentiel, révolu. Même si le mode de fonctionnement actuel du milieu de la recherche et son environnement concurrentiel conduisent encore largement à des logiques d'hyper-spécialisation sur des questions pointues et en général très techniques, l'avenir plaide en faveur de l'ouverture intellectuelle. L'organisation encore très traditionnelle de la plupart des laboratoires en axes thématiques se double d'interactions de plus en plus fortes entre ces axes. La tendance qui se dessine peu à peu est celle d'une vision transversale aux disciplines, car fondée sur des objets de recherche, voire sur des outils. Les sciences économiques et de gestion retrouvent, ou du moins renforcent, leur identité de sciences sociales, dans le sens où elles sont appelées à trouver une nouvelle légitimité dans leur capa-

cité à apporter des réponses à des problèmes de société. La capacité future de l'économie et de la gestion à relever ce défi avec succès dépend de leur capacité à dialoguer avec les autres sciences humaines et sociales aussi bien qu'avec les sciences exactes, et à se nourrir de ce dialogue.

Une vision moderne de l'organisation de la recherche se doit de placer l'interdisciplinarité au cœur de sa démarche, au sein des sciences humaines et sociales et au-delà vers les sciences exactes. Dans cette optique, l'interdisciplinarité ne peut pas seulement être déléguée à une poignée de CID, elle doit être portée par la section économie-gestion elle-même comme étant une stratégie majeure de régénération des cadres traditionnels de la pensée. Nombreux sont les travaux qui vont dans ce sens et il nous semble important de ne pas abandonner cette orientation aux aléas des initiatives locales. C'est le rôle du CNRS que de porter une vraie politique scientifique nationale délivrée des contraintes de sites et de contribuer à insuffler des initiatives ambitieuses aux frontières de la connaissance. C'est pourquoi nous pensons que le CNRS a un rôle important

à jouer dans le secteur de l'économie-gestion, et que, contrairement à ce que sous-entendent certaines prises de position récurrentes, ce rôle ne doit certainement pas se résumer pour le CNRS à devenir une simple agence de moyens.

Si la mise en œuvre de l'interdisciplinarité est jugée prioritaire car souhaitable pour le progrès des connaissances, elle demeure peu rentable au niveau individuel (et même à celui des laboratoires). Dès lors, une refonte du système d'incitations et du fonctionnement institutionnel serait sans doute bienvenue au sein du CNRS (et de la recherche publique en général) pour opérer cette réorientation des pratiques de production scientifique. Cela suppose en particulier de redonner au CNRS son rôle de planificateur dans le domaine de la recherche publique, capable de contrecarrer les effets pervers de la concurrence internationale – et notamment l'hyperspécialisation – en offrant aux chercheurs des incitations fortes à l'interdisciplinarité.

Claude Diebolt
pour la Section 37 du CoNRS
Strasbourg, le 29 septembre 2019

SECTION 38

ANTHROPOLOGIE ET ÉTUDE COMPARATIVE DES SOCIÉTÉS CONTEMPORAINES

Composition de la section

Nathalie LUCA (présidente de section), Katia BOISSEVAIN (secrétaire scientifique), Nicolas ADELL, Anath ARIEL DE VIDAS, Irène BELLIER, Philippe BLANC, Michel BOIVIN, Isabelle CHARLEUX, Chantal CRENN, Élise DEMEULENAERE, Bernard FORMOSO, Susanne FURNISS-YACOUBI, Laurence HERAULT, Charles ILLOUZ, Marie LERAT, Céline LESOURD, Sabrina PASTORELLI, Boris PETRIC, Nicolas PUIG, Philippe RAMIREZ, Sébastien TANK-STORPER.

Introduction

Prenant appui sur l'analyse de l'ensemble des dossiers qu'elle a eu à évaluer depuis 2016, la section 38 a souhaité, dans un premier temps, faire le point sur l'évolution des objets et des terrains dont s'emparent aujourd'hui l'anthropologie et la sociologie des religions.

Elle a par ailleurs choisi de mettre l'accent sur la façon dont l'anthropologie collabore avec les autres disciplines de l'InSHS d'abord, et des autres instituts ensuite, pointant à la fois les sujets qui se prêtent à cette collaboration, et le danger que représenterait un trop grand brouillage des frontières.

Constatant que malgré la très grande actualité des sujets dont elle traite, l'anthropologie demeure insuffisamment (re)connue, il apparaît utile de souligner tout ce qu'elle met en œuvre pour renforcer sa visibilité et d'interroger sa place dans les réseaux internationaux.

Finalement, il n'était pas possible de clore cet état des lieux sans revenir, à la suite de nos prédécesseurs, sur les conditions de plus en plus difficiles dans lesquelles se fait la recherche, des conditions unanimement déplorées par les directrices et les directeurs d'unité où sont affecté.es les anthropologues et les sociologues des religions, qui dépendent également de la section 38 du CoNRS.

I. Évolutions de la construction de l'objet anthropologique

Historiquement, la discipline anthropologique s'est construite du point de vue épistémologique sur l'étude des formes d'altérité sociale et culturelle et, sur le plan méthodologique, par l'immersion prolongée et répétée dans un terrain défini par son unité de temps, de lieu et de groupe de personnes.

Cette démarche privilégiait le recueil de données qualitatives par recours à l'observation participante afin de produire, sur une base monographique, des connaissances relatives à des sociétés de l'ailleurs, qu'elles soient du proche ou du lointain. Si la compréhension de l'altérité s'est construite dans un premier temps par éloignement géographique et ethnoculturel, sur des groupes de taille réduite, elle porte désormais de manière croissante sur des terrains intégrés dans des réseaux et des contextes sociaux de plus en plus larges (régionaux, nationaux, internationaux) et auxquels appartiennent souvent les chercheurs. Très significativement, 47,5 % des programmes de recherche présentés par les candidats auditionnés lors du concours CRCN 38 en 2018 prenaient pour échelle de résolution non pas l'« ethnologie », mais « la nation » ou plusieurs contextes nationaux mis en perspective (tableau 1). Ces évolutions impliquent fréquemment pour les anthropologues de travailler de manière multi-située. L'approche initialement holiste évolue progressivement pour privilégier l'étude de processus ou de phénomènes contextualisés, engageant des individus et/ou collectifs en composition et recomposition permanente. Le « terrain » n'est plus considéré comme un donné déjà en place mais comme un objet construit, tandis que la réflexivité du chercheur est intégrée à l'écriture.

Tout en restant ancrés dans des recherches localisées qui questionnent la pratique, les logiques d'organisation et l'activité symbolique, de

nombreux anthropologues redéployent leurs méthodes et leurs épistémologies en faisant varier les jeux d'échelles (régionales, transrégionales, nationales, transnationales) sur des questions longtemps réservées à d'autres disciplines. Les migrations et les circulations transnationales d'objets, de techniques, de styles et de formes de croyance comptaient ainsi pour 35 % des objets de recherche proposés par les candidats auditionnés lors du concours CRCN 38 en 2018 (tableau 1).

De même, les anthropologues s'emparent des grands enjeux du contemporain : les risques environnementaux, le génie génétique, le vieillissement, l'intelligence artificielle, la robotique, les relations homme-animal ; autant de thématiques qui amènent certains d'entre eux à s'interroger sur les frontières de l'humain. Parmi les chercheurs CRCN recrutés ces dernières années, certains travaillent sur la fabrique de la personne dans un contexte de recours à la fécondation *in vitro*, d'autres traitent de l'appropriation récente des connaissances et technologies de la génétique médicale dans la Péninsule arabique, d'autres encore explorent les ethnothéories du vivant ayant cours en Mésopotamie dans une perspective élargie aux animaux et végétaux.

Les anthropologues s'intéressent désormais aux sonorités du monde et à leur portée et significations sociales. En France, une partie d'entre eux, regroupée dans le collectif MILSON, se livre à l'exploration des milieux sonores dans le monde contemporain, à l'époque actuelle comme dans le passé.

À travers ces nouveaux objets et d'autres plus classiques, les anthropologues revisitent des thèmes fondamentaux de la discipline avec toujours plus d'acuité, qu'il s'agisse du genre, de l'identité, du politique, des croyances, du rituel, de la parenté, de l'opposition tradition/modernité, des rapports à l'environnement ou encore des modalités du vivre ensemble. De quelles manières les familles recomposées, homoparentales ou transparentales transforment-elles la filiation et la parenté ? Pourquoi et sous quelles formes certaines élaborations religieuses se prêtent-elles à une marchandisation globalisée ? Quelles

recompositions identitaires entraînent l'inscription d'un site ou d'une pratique sur la liste du patrimoine de l'UNESCO? Comment émergent de nouveaux acteurs politiques et culturels dans un monde globalisé? Tels sont quelques-uns des nouveaux objets que construisent aujourd'hui les anthropologues pour traiter de ces thèmes. *In fine* il s'agit de relativiser par décentrement successifs les catégories à partir desquelles les chercheur.es ont l'habitude de penser le(s) monde(s).

Tableau 1 : Répartition des candidats sélectionnés pour les auditions du concours CRCN 2018 par type d'objet d'étude.

Type d'objet d'étude	Nombre	Pourcentage
Ethnologie comparée de plusieurs groupes d'une même aire culturelle et/ou partageant un même système d'activités	5	8%
Migrations internationales et traitement des migrants par les pays d'accueil	10	16%
Circulations transnationales (des techniques, savoirs, artefacts culturels) et impact sur les sociétés émettrices et réceptrices	12	19%
Recherches prenant l'État-nation comme cadre de référence	18	28,5%
Recherches comparant plusieurs contextes nationaux d'une même région ou zone linguistique	12	19%
Recherches sur l'encodage culturel des processus de production scientifique, technologique, ou sur les perceptions sensorielles appréhendées à partir de plusieurs contextes sociétaux.	6	9,5%
TOTAL	63	100,0%

La discipline anthropologique continue à élaborer en ce début de XXI^e siècle une bonne part de ses objets à partir de situations extra-européennes et de ce fait apporte toujours une contribution irremplaçable à la connaissance des cultures humaines, saisies

dans leur extraordinaire variété et leur grande plasticité. Ainsi, 87% des chercheur.es relevant de la section 38 du Comité national du CNRS étudient des sociétés situées hors de France (DOM-TOM inclus) et 79% hors d'Europe (tableau 2). Il en résulte un fort investissement dans l'étude des langues locales, des temps plus longs d'élaboration des projets que dans d'autres disciplines et, par voie de conséquence, des évolutions de carrière plus lentes. En termes de couverture des différentes aires culturelles, la politique de recrutement du CNRS a démontré sa pertinence ces dernières années. Elle a permis de combler certains manques constatés dans les établissements de l'enseignement supérieur ou dans d'autres organismes de recherche, même si certaines régions restent sous-étudiées (l'Amérique du Nord, l'Océan indien, ou l'Europe centro-orientale et du nord). Dans le cas du Proche et du Moyen-Orient, 77% des anthropologues travaillant en France sur ces pôles civilisationnels et zones géopolitiques de tout premier plan sont employés par le CNRS et ont été recrutés pour la plupart au cours des quinze dernières années.

Tableau 2 : Répartition des compétences aréales des anthropologues CNRS (% par rapport à l'ensemble des chercheurs et enseignants-chercheurs travaillant en France sur ces régions).

Europe : 41 (47,6%)	orientale : 2
	France : 25
	méridionale : 9
	septentrionale : 5
Proche & Moyen-Orient (77%)	17
Afrique : 41 (36,3%)	saharienne : 14
	sub-saharienne : 27
Asie : 43 (55%)	du Sud & Himalaya : 19
	centrale : 3
	Chine-Japon-Corée : 9
	du Sud-Est : 12

Océan indien (16,6%)	2
Océanie (53,3%)	16
Amérique : 28 (36,4%)	du Nord : 4
	Centrale & caraïbéenne : 13
	du Sud : 11
Sans spécialité régionale	5

II. La sociologie des religions : horizons théoriques et institutionnels

À l'instar de leurs collègues anthropologues, les sociologues des religions ont également opéré un important mouvement de décentrement des approches et des catégories à partir desquelles leur discipline abordait classiquement son objet.

Si la sociologie des religions s'est construite autour du paradigme de la sécularisation (interrogeant plus largement le devenir des religions ou du religieux dans un monde moderne pensé comme étant sorti de la religion), l'attention des sociologues des religions se porte désormais davantage sur les logiques de recomposition religieuse en fonction des différents contextes politiques et sociaux, souvent hors d'Europe (Pakistan, Indonésie, États-Unis, Amérique du Sud, Maghreb et Proche-Orient). L'opposition entre religion et modernité est désormais fortement questionnée, notamment sous l'impulsion des théories postcoloniales qui interrogent la distinction classiquement posée entre le religieux et le séculier.

Ces évolutions théoriques ont conduit à revisiter les objets classiques de la sociologie des religions (laïcité, école, bioéthique, etc.). Dans le même temps, les objets que constituaient les *religions* ou les institutions reli-

gieuses ont progressivement laissé place aux manifestations individuelles du *croire* (terme qui se substitue parfois au terme de religieux). Le fait religieux – ou le croire – est désormais appréhendé comme un phénomène essentiellement dynamique. Il est désormais prioritairement abordé sous l'angle des trajectoires croyantes individuelles, ce dont témoigne notamment le nombre important de recherches consacrées aux parcours de conversion ou, plus récemment, aux parcours dits de « radicalisation » – en proposant d'ailleurs le plus souvent une approche critique de cette notion et de ses usages politiques.

La place de l'objet religion au sein de la sociologie française demeure cependant paradoxale. Alors que la question du devenir des religions dans le monde moderne était au cœur du questionnement des fondateurs de la sociologie, et alors que, depuis quelques années (notamment depuis 2001), la demande sociale de compréhension des manifestations politiques du religieux ne cesse de s'affirmer, les sociologues semblent aujourd'hui toujours aussi réticents à se saisir de l'objet – même si la prolifération du religieux hors religion a conduit certains non spécialistes à aborder la question religieuse, renouvelant parfois les problématiques et les approches et contribuant à un « retour du social » en sociologie des religions.

Malgré ces recherches prometteuses, la place institutionnelle réservée à l'objet religion et aux sociologues qui s'y consacrent reste précaire. Sur les 392 882 thèses consignées sur le site *theses.fr* depuis 1985, environ un millier mentionnent dans le titre « religion », « religieux » ou « religieuse ». Parmi elles, seules 8 à 10 % sont des thèses de sociologie. Peu de sociologues des religions ont été recrutés au CNRS par la section 38 ces quinze ou vingt dernières années (5 recrutements en vingt ans). Cela est d'autant plus regrettable que la sociologie des religions reste peu représentée à l'université (à l'exception des bastions historiques de la discipline que sont l'EHESS, l'EPHE et l'Université de Strasbourg, et à l'exception récente de la création de postes de politistes exclusivement consacrés à la question de la radicalisation), de nombreuses formations en sociologie ne pro-

posant tout simplement pas d'enseignement de sociologie des religions.

III. La présence de l'anthropologie dans les projets interdisciplinaires

La force de l'anthropologie provient des enquêtes qualitatives de terrain, réalisées selon une approche compréhensive, sur de grands enjeux contemporains qui mobilisent également d'autres disciplines davantage rompues à des méthodes statistiques et quantitatives. La collaboration avec ces disciplines apporte des données et interprétations complémentaires qui enrichissent les études ainsi réalisées.

On distingue classiquement la pluridisciplinarité, considérée comme la juxtaposition de plusieurs disciplines au sein d'un même projet de recherche, et l'interdisciplinarité qui implique que l'objet soit co-construit en tenant compte des regards des autres disciplines, ce qui peut nécessiter que le/la chercheur.e impliqué.e développe plusieurs compétences, voire une double formation. La transdisciplinarité est censée marquer un degré d'intégration encore plus fort entre disciplines. Lorsque plusieurs disciplines convergent vers le même objet, on pourra parler d'interdisciplinarité « orientée objet ». La structuration de champs de recherche interdisciplinaires au sein des sciences humaines et sociales a donné lieu à l'émergence de « domaines d'étude », ou *studies*. Les institutions de recherche tendent à valoriser une interdisciplinarité dite « forte », c'est-à-dire entre disciplines comportant un fort écart de cultures épistémiques au CNRS. Cela se traduit par une invitation à articuler des disciplines relevant d'instituts différents. L'interdisciplinarité a été analysée comme un mot d'ordre autant institutionnel qu'épistémologique, associé depuis les années 1950 à une promesse de disruption, le rapprochement inédit de plu-

sieurs disciplines étant supposé faire émerger des façons novatrices d'aborder des problèmes ou phénomènes complexes. Il s'agit alors de dépasser les frontières disciplinaires pour mieux comprendre les phénomènes et objets étudiés, ce qui nécessite néanmoins une assise disciplinaire solide : chacun.e des chercheurs impliqué.es doit savoir d'où il/elle parle pour que la complémentarité interdisciplinaire porte réellement ses fruits.

A. Liens avec les disciplines de sciences humaines et sociales

L'anthropologie entretient de longue date des liens organiques avec les autres disciplines de sciences humaines et sociales. Des cadres théoriques forts – comme le structuralisme ou le marxisme – ont permis de réunir linguistique, sémiologie, anthropologie, sociologie, philosophie, psychanalyse, histoire, ou muséologie. Si l'inventaire et la conservation de connaissances approfondies de groupes peu ou mal connus n'est plus une perspective courante aujourd'hui, ils ont donné lieu à des collaborations étroites avec la linguistique, notamment, pour le travail de traduction et de faits de langue par lesquels les personnes expriment leurs savoirs et leur être-au-monde. Parmi les nombreux exemples de collaboration fructueuse avec la linguistique, citons l'*Encyclopédie des Pygmées Aka* dont le dernier et 16^e volume vient de paraître après 37 années de recherche collective. On constate des collaborations sans équivalent avec d'autres disciplines, comme la géographie pour les travaux liés à l'espace, ou l'histoire pour les objets installés dans une séquence chronologique. Si, depuis la fin du xx^e siècle, se multiplient les recherches au croisement de l'ethnologie et de l'histoire, elles prennent deux directions différentes : d'une part, un regard ethnologique posé sur les sources des historiens – notamment les archives écrites, sonores et audiovisuelles – et, de l'autre, une attention accrue aux représentations locales – et bien souvent orales – des faits de l'histoire des sociétés, sou-

vent désignées par le terme « ethnohistoire ». Par ailleurs, de nombreux rapprochements s'opèrent à l'heure actuelle dans le monde académique anglophone entre recherches archéologiques et ethnologiques, notamment sur les sociétés de chasseurs-collecteurs. En France ce mouvement reste timide. Cependant, les programmes sur les histoires de peuplement et des migrations – en Insulinde, en Afrique centrale ou en Océanie par exemple – croisent des données archéologiques avec des données ethnologiques, ethnomusicologiques et linguistiques actuelles. En effet, l'archéologie permet de disposer d'une profondeur historique sur les populations étudiées, quand il n'y a aucune autre possibilité d'accéder au passé.

Les emprunts faits au protocole d'investigation empirique, spécifique de l'anthropologie, ont créé des passerelles voire, parfois, un brouillage des frontières avec d'autres disciplines telles que la sociologie, la géographie culturelle, la philosophie pragmatique ou encore la science politique... Ce brouillage est d'autant plus grand que l'anthropologie a pour sa part critiqué l'objet « tradition » (pourtant historiquement au fondement de la réflexion anthropologique) pour le risque qu'il contient d'une réification des groupes étudiés, s'emparant au contraire des mutations les traversant. On notera ici qu'un élargissement des domaines de recherche suscite d'intéressantes collaborations avec des juristes. Travaillant sur des sociétés industrialisées, y compris la leur, les anthropologues abordent désormais également des thématiques de recherche qui nécessitent le dialogue ou la collaboration avec les autres disciplines : genre et nouvelles formes de parentalité, migration, violence, santé, développement des humanités numériques, conséquences du développement des nouvelles technologies reproductives ou des robots humanoïdes sur l'humain et la vie en société, pour ne prendre que quelques-uns des thèmes qui reviennent régulièrement dans les projets des candidat.es. Ces changements thématiques participent de l'intégration progressive de l'anthropologie dans des recherches pluri- ou interdisciplinaires menées avec d'autres instituts du CNRS.

B. Liens hors INSHS

Dans ce cadre, différentes configurations de collaborations entre disciplines se développent.

1. Un terrain, plusieurs disciplines

Un terrain peut être partagé par des disciplines différentes, pour documenter plusieurs dimensions de la vie de telle ou telle société : on peut retenir comme exemples les recherches menées sur l'archipel Kangean, en Indonésie de l'est, qui ont articulé notamment linguistique, géophysique, ethnologie, écologie, les recherches au long cours menées dans le programme « Avenir des Populations des Forêts Tropicales » ou encore les recherches menées au sein du projet SOGIP financé par le Conseil européen de la recherche sur « les échelles de gouvernance et les peuples autochtones ». Dans cette configuration pluridisciplinaire, l'exigence d'articulation des disciplines n'est pas poussée, mais le dialogue, autour d'un terrain partagé, de chercheurs de disciplines différentes peut conduire à l'élaboration de questions interdisciplinaires.

2. Collaboration avec la génétique

Les programmes déjà mentionnés sur l'histoire du peuplement en Asie, en Afrique et en Océanie, reposent sur une collaboration forte avec la génétique et sont pour certains menés dans des équipes de chercheur.es de plusieurs disciplines. La fécondation ethnologie-génétique influe sur certains objets de recherche comme par exemple les conséquences génétiques des choix de conjoints déterminés par des contraintes culturelles, ou la modélisation des liens entre les multiples groupes formant diaspora dans de vastes espaces insulaires. Dans la tradition de l'ethnoscience, largement ancrée dans le domaine des rapports entre homme et environnement, il existe une longue expérience de

collaboration entre anthropologie, linguistique, botanique, zoologie ou d'autres disciplines des sciences naturelles, autour de l'étude des classifications vernaculaires du monde vivant. Cette tradition est réactualisée aujourd'hui dans les études environnementales dans un contexte où les savoirs et savoir-faire écologiques locaux mis au jour par l'anthropologie regagnent en intérêt en général, et dans les grandes institutions internationales traitant du changement global en particulier (climat, biodiversité).

3. Recherches interdisciplinaires émergentes

Dans cette dynamique interdisciplinaire, des recherches émergent, dans lesquelles l'apport de l'anthropologie est loin d'être périphérique :

Le tout récent recrutement d'une CR travaillant sur les marées vertes, et d'une autre (en CID52) sur les pesticides, démontrent la pertinence de la démarche anthropologique pour l'étude des populations affectées par le changement écologique (pollutions industrielles, eutrophisation...) et leurs dynamiques d'adaptation à des environnements changeants. Dans cette même perspective, on constate un enrôlement croissant d'anthropologues dans des études sur les dynamiques des « systèmes socio-écologiques » – dont les travaux trouveront un écho particulier en CID52.

En anthropologie culturelle, des méthodes phylogénétiques sont utilisées en ethnomusicologie pour étudier la diversification des harpes africaines en combinant critères relevant de la parenté, de la culture matérielle, du contexte social et religieux et de l'acoustique des matières.

Dans le contexte contemporain où les savoirs et innovations scientifiques et techniques affectent de plus en plus les sociétés, les anthropologues rappellent l'importance de symétriser le regard et d'inclure dans leur objet d'analyse des pratiques et représentations de la nature des diverses communautés épistémiques

qui composent le monde scientifique. Ces courants de l'anthropologie qui empruntent aux études sociales des sciences revendiquent une anthropologie *avec* et *sur* les scientifiques. Les collaborations interdisciplinaires entre anthropologues et chercheurs en sciences de la vie s'inscrivent de plus en plus souvent dans des projets dits participatifs (reposant sur la coproduction de données voire de questionnements de recherche avec les populations impliquées). L'anthropologue s'y révèle alors à la fois un facilitateur et un analyste de la relation entre scientifiques et populations impliquées, une double posture qui n'est pas sans poser de difficultés.

Le succès actuel des propositions visant à élargir l'anthropologie au-delà de l'anthropos se traduit par un engouement pour les « études multi-espèces », approchant la vie des sociétés humaines dans leurs interactions avec des êtres non-humains. Le champ déjà bien établi des études animales (*animal studies*) s'est en partie construit sur des collaborations avec des philosophes (philosophes de la biologie, éthiciens de l'environnement), mais également sur des collaborations avec des éthologues ou des spécialistes en biologie animale. Dans ce mouvement d'élargissement de l'anthropologie à d'autres espèces, on peut d'ores et déjà anticiper la structuration de travaux anthropologiques s'intéressant à l'entrelacement entre sociétés humaines et vie végétale, microbienne ou fongique, qui mobiliseront les spécialistes de ces taxons. Si certaines de ces études multi-espèces se confrontent à quelques écueils (la spéculation intellectuelle, la paraphrase de savoirs scientifiques, le retour à un réalisme naïf...), d'autres permettent de revisiter de façon stimulante des thématiques classiques de l'anthropologie des techniques telles que la domestication, la sélection, la fermentation.

Le regain d'intérêt (comme un retour de balancier après l'âge d'or du constructivisme) pour la matérialité du monde et sa place dans la vie des sociétés, se traduit par l'essor d'une anthropologie matérielle pleinement intégrée dans le questionnement des disciplines de sciences « dures » ayant la matérialité pour objet.

Non sans lien, il se développe aujourd'hui une anthropologie cognitive dont la spécificité est de s'intéresser aux interactions réciproques entre les contraintes de l'esprit et les contraintes sociales et culturelles. Si l'anthropologie cognitive continue à être controversée sur certains sujets très sensibles – tels que les processus de radicalisation par exemple –, pour la tendance à l'essentialisation et au réductionnisme que ses théories comportent, il n'en demeure pas moins qu'elle a participé au développement de domaines de recherche dont certains se sont profondément réorientés : anthropologie de l'enfance, du sensible (passant par l'émotion, la passion, le goût), du corps (questionnant la relation de l'homme aux robots, les conséquences des appareillages multiples, la mise en place de nouvelles structures pour gérer les maladies neurologiques telle que la maladie d'Alzheimer) ou de la mémoire. L'ensemble de ces sujets en plein développement se construit très majoritairement dans des projets interdisciplinaires.

On notera pour dernier exemple, la volonté récente de travailler avec des disciplines artistiques, et ce faisant, le développement des collaborations d'anthropologues avec des musiciens et des artistes, qui, même si les résultats sont encore hésitants, pourrait être porteur d'un renouvellement considérable des dispositifs de la recherche. Les étudiant.es actuel.les en anthropologie s'interrogent également sur ces nouveaux dispositifs en organisant des colloques ayant pour thème ces collaborations et leurs impacts sur les données recueillies et/ou restituées ainsi que sur les identités professionnelles de chacun.

4. Défis et difficultés

Cette stimulante dynamique interdisciplinaire ne doit cependant pas faire oublier les difficultés qu'elle contient. Il s'avère déjà extrêmement important que les disciplines auxquelles appartiennent le/la chercheur.e soient bien identifiées et ne disparaissent pas dans une totale confusion des frontières qui serait contre-productive. Chaque discipline

peut avoir besoin de travailler selon des espaces et des temporalités différentes et l'évaluation de sa participation doit être faite selon des critères qui lui restent spécifiques. Bien qu'il ne fasse aucun doute que dans de telles constellations interdisciplinaires, l'anthropologie doit montrer une certaine souplesse quant à la communication de ses concepts et méthodes, l'autonomie des questionnements de chaque discipline doit être respectée ; or dans les collaborations avec les sciences dites dures, le risque est grand que les anthropologues ne soient mobilisés que comme des facilitateurs d'entrée sur des terrains difficiles, comme des traducteurs culturels, ou qu'ils soient assignés à l'étude des représentations culturelles d'un monde sur lequel *in fine* les sciences dures offrirait les résultats les plus importants.

La restitution à travers des écrits à plusieurs voix de chercheur.es issu.es de différentes disciplines présente des difficultés qu'il ne faut pas sous-estimer. Le formatage des publications dans chaque domaine étant radicalement différent, il serait regrettable que la publication dans des revues hors discipline ou, à l'inverse, dans des monographies, soit préjudiciable aux chercheur.es dans l'évaluation de leur recherche. L'interdisciplinarité fonctionne essentiellement sur projet et a besoin d'un ancrage dans une discipline de référence. Le risque est un isolement excessif des chercheur.es au sein de laboratoires où leur spécialité n'est pas représentée, entraînant une perte de compétence disciplinaire.

III. Visibilité de la discipline

Cette mise en garde est d'autant plus opportune qu'il faut constater paradoxalement que l'anthropologie rencontre toujours des difficultés à être comprise, à occuper une place forte et reconnue au sein de la société. Un problème de visibilité demeure, qui la fragilise. Que sait le grand public sur l'anthropologie ? Qu'en fait-il ? Que comprend-il de ce que font

les anthropologues ? Une difficulté tient probablement à l'histoire même de la discipline, et à ses contours mouvants : « science de l'humain », elle couvrirait à son origine à la fois les aspects biologiques et socio-culturels de l'étude des sociétés humaines. Au fil du temps, les approches anthro-biologiques et ethnologiques ont divergé, ce qui s'est traduit par exemple en 1992 par la division de la section 33 du CoNRS, intitulée « anthropologie, préhistoire, ethnologie » en deux sections distinctes (31 et 38). Parallèlement, l'usage a progressivement changé dans la dénomination des chercheurs. En ethnologie : l'ethnie apparaissant une catégorie de moins en moins pertinente, leurs objets d'étude se déplaçant vers des thématiques transversales à plusieurs sociétés, ils ont massivement adopté le label d'anthropologues, peut-être également influencés par l'usage anglophone. Ces glissements sémantiques nourrissent l'incompréhension dans le grand public et les médias sur ce qu'est et ce que fait l'anthropologie. Il nous est parfois nécessaire, pour nous démarquer des chercheurs qui étudient, notamment, les crânes humains, de préciser que nous faisons de l'anthropologie « sociale et culturelle », une précision difficile à intégrer de façon synthétique dans le nom de notre métier.

Les acteurs sociaux, l'école, les médias, donnent une certaine visibilité aux thématiques que nous traitons mais rarement à la discipline elle-même. Nous devons toujours expliciter ce qu'est l'anthropologie et sommes bien moins connus que les spécialistes dont les disciplines sont enseignées au collège et au lycée, alors même que nos apports sont recherchés. Au lycée, les savoirs des anthropologues sont étudiés en philosophie, si bien que nos objets se confondent avec ceux de cette discipline alors même que nos méthodes et voies analytiques diffèrent profondément. Les initiatives pour introduire l'anthropologie à l'école se limitent aux accords que des anthropologues (généralement hors statut) passent avec certains établissements, souvent pour faire face aux enjeux de la diversité culturelle. S'ajoute à cela que le cursus universitaire complet d'anthropologie est très récent, même si cette discipline est enseignée depuis de longues

années dans de nombreuses universités françaises, au moins sous forme optionnelle. De fait, il demeure cette impression d'un concours de facteurs qui tend à rendre l'anthropologie invisible. Cette situation est d'autant plus préoccupante que l'anthropologie – il faudrait préciser ici « sociale et culturelle » –, qui travaille sur les rapports de pouvoir, les relations sociales, les constructions culturelles, dans une perspective empirique qui est aussi porteuse de critiques, fait partie de ces sciences sociales dont les analyses sont parfois mal reçues des politiques et du grand public (c'est particulièrement vrai pour les questions qui suscitent débat et inquiétude comme le religieux, le genre, les migrations ou les déchets). Au point que certains pays comme la Pologne ou le Brésil cherchent tout simplement à la faire disparaître des enseignements universitaires. On peut toutefois noter la place importante qu'occupe l'anthropologie en France dans les formations professionnalisantes comme les IUT, les formations en travail social, en animation socio-culturelle professionnelle, dans les écoles d'architecture et dans les facultés de médecine et les IFSI. Elle est devenue ces dernières années une discipline centrale pour des professionnels qui ont besoin de mieux comprendre les inégalités sociales, les mécanismes de discriminations comme les agentivités des acteurs défavorisés. L'anthropologie dans ces contextes favorise la réflexivité professionnelle.

A. Activités de visibilité scientifique

1. Les revues

En France néanmoins notre discipline est particulièrement active. Ainsi, à l'automne 2017, 29 revues scientifiques estimaient relever des compétences de la section 38 et avaient pour cela choisi d'être évaluées par elle. Pour 26 d'entre elles, la section a reconnu d'une part qu'elles relevaient en effet du champ de l'anthropologie sociale et culturelle ou de la

sociologie des religions, et d'autre part qu'elles remplissaient les critères des « bonnes pratiques » de l'édition scientifique tels que l'InSHS les a définis⁽¹⁾. Ces revues offrent un paysage d'une très grande diversité, tant au plan de leurs domaines affichés de compétences – des plus généralistes jusqu'à celles qui affichent une spécialisation régionale ou thématique –, qu'au niveau des rythmes et des supports de publication. Cette diversité est l'une des richesses du paysage scientifique français qui doit, par ailleurs, relever trois principaux défis :

Le premier concerne le renforcement de la pratique de recherche sur projets, dans le cadre de programme collectifs en particulier. Cette systématisation a eu pour effet une augmentation significative des propositions de dossiers thématiques et une baisse corrélative des soumissions d'articles spontanés qui, jusque-là, restaient l'un des moyens d'évaluer l'impact d'une revue dans un champ disciplinaire et son niveau d'exigence (par son taux de refus des *varia*). La transformation des pratiques de recherche et des modes de financement de la recherche nécessite une réévaluation de ces critères.

Un second défi a été lancé par la loi pour une République numérique du 7 octobre 2016 qui a affecté non seulement le modèle économique de certaines revues – celles qui étaient publiées par des éditeurs privés notamment – mais également les modes de publication. La loi a suscité chez certains – *Terrain, Techniques & culture* entre autres – une réflexion sur les places respectives du numérique et du papier dans la diffusion de la revue conduisant à l'idée que l'on pouvait dissocier les contenus selon les supports : en ligne, les articles développés, adressés à la communauté des chercheurs et spécialisés ; pour le papier, les textes accessibles à un public élargi où la place de l'illustration donne au numéro l'allure d'un « beau livre ».

Enfin, toutes les revues sont aujourd'hui confrontées à l'internationalisation, notamment de leurs contenus, par le biais des portails (OpenEdition.org et Cairn.info principalement en France pour les SHS) qui les rendent poten-

tiellement accessibles au monde entier. Par ailleurs, l'anglais restant la langue principale de la communication scientifique internationale, la possibilité de publier dans cette langue dans des revues françaises fait désormais partie des demandes des chercheurs étrangers mais également français. L'élargissement de l'espace de réception d'un texte qui en découle – et l'abandon presque généralisé de la traduction de l'anglais vers le français au niveau des articles scientifiques – justifie la demande régulièrement réitérée que des politiques de traduction d'articles du français vers l'anglais se mettent en place tant au niveau de l'InSHS qu'à l'échelle de chacune des revues.

2. Open edition

En *open edition*, le portail de ressources électroniques en sciences humaines et sociales, on répertorie :

– sur 2 982 carnets de recherche, 152 en anthropologie (dont 21 en anglais).

– sur 511 revues, 52 en anthropologie et en plusieurs langues (dont 12 en anglais).

– sur 7 461 livres, 211 livres compris dans la discipline (dont 30 en espagnol et 12 anglais).

Depuis 2012, le moteur de recherche ISIDORE permet l'accès aux données numériques des sciences humaines et sociales (SHS) en s'appuyant sur les principes du web de données, notamment par accès libre (*open access*). Parmi les disciplines répertoriées, il comprend « Anthropologie biologique » et « Anthropologie sociale et ethnologie ».

Si on recherche l'anthropologie parmi les sujets, on retrouve 38 149 notices :

– 5 297 colloques et conférences de 2012 à 2019 (il comprend aussi les données de Calenda) ;

– 1 824 séminaires (il comprend aussi les données de Calenda) ;

– 1 175 mémoires, thèses et HDR ;

– 2 313 billets et blogs (il comprend les billets et les blogs du Carnets de recherche Hypothèses).

Enfin, l'encyclopédie libre **Wikipédia** présente un Portail de l'anthropologie de 4 047 articles.

3. Archives des ethnologues

La « Très Grande Infrastructure de recherche » HUMANUM soutient des consortiums impliqués dans la production raisonnée de corpus de sources en SHS. L'un d'entre eux, « Archives des ethnologues », participe à la sauvegarde, à la valorisation et à la mise à disposition des matériaux de terrain collectés par des ethnologues, et mène une réflexion sur la singularité de ces données. Il regroupe huit centres de documentation spécialisés CNRS ou universitaires.

Avec le départ à la retraite d'un nombre croissant d'ethnologues, les dépôts d'archives de terrain dans les laboratoires se multiplient et parallèlement un nombre croissant de jeunes chercheurs souhaitent pouvoir exploiter ces archives pour leurs travaux.

Il en est de même des archives sonores rassemblées par les ethnomusicologues et anthropologues qui ont gagné significativement en visibilité par la plateforme Telemeta (<https://archives.crem-cnrs.fr/>) dont la réalisation a été récompensée par un Cristal collectif en 2019.

B. Ouverture vers des publics diversifiés

1. Expositions

L'anthropologie contemporaine cherche à approcher des publics diversifiés et à se projeter hors des espaces purement académiques. Le dialogue avec ces publics s'inscrit dans des lieux institutionnels de la muséographie au sein desquels les collections permanentes

sont accompagnées d'expositions insistant sur la contribution de l'anthropologie dans la compréhension des enjeux les plus saillants, et parfois, les moins visibles, du monde actuel. Le musée du Quai Branly explore par exemple de nombreux thèmes à la fois universels et contemporains, comme celui du corps et de l'apparence (exposition « Tatoueur, tatoués » mai 2014-octobre 2015) ou celui des frontières de l'humain « Persona, étrangeté humaine » en 2016 ; au Musée de l'Homme, c'est le racisme qui est l'objet du questionnement muséal : exposition « Nous et les autres. Des préjugés au racisme » ; au MUCEM, l'exposition « Lieux saints partagés », une exposition devenue itinérante, en France et à l'international, connaît un remarquable succès. Ces expositions sont accompagnées de publications, et de conférences voire, pour ce qui est de « Lieux saints partagés », d'un documentaire. Dans ce déploiement d'une « anthropologie publique », la thématique centrale de la migration fait l'objet d'un investissement important. Le musée national de l'histoire de l'immigration lui est entièrement consacré et accueille des expositions régulières sur ce thème. On peut noter la place particulière du musée d'ethnographie d'Aquitaine à Bordeaux dont les expositions accueillent en moyenne 3 000 personnes (dont des scolaires) sur une année universitaire. L'exposition *Enquête de santé* a été co-construite avec les patients eux-mêmes. Le contenu de la valise de migrants a été élaboré à partir d'objets prêtés par les Sénégalais de Bordeaux lors d'enquêtes de terrain concernant les médecines, les plantes, l'eau sacrée etc.

2. Serious games

La question migratoire est également mobilisée dans la confection de « *serious games* », à l'instar du jeu *Migr'Art* qui se présente comme une recherche en sciences sociales (sociologie, anthropologie visuelle, histoire de l'art) mobilisant « art contemporain, transmission pédagogique et création numérique à travers l'élaboration d'un jeu vidéo ». Le jeu vidéo documentaire et artistique intitulé « A Crossing

industry» porte quant à lui sur le régime de fonctionnement de séparation israélien en Cis-jordanie saisi dans les années 2007 à 2010.

3. Festivals

Certains festivals donnent également une visibilité à l'anthropologie. Ils portent des initiatives visant à approcher des publics diversifiés en développant des dispositifs de création et des modes de restitutions adéquats. Les arts de la performance (musique, danse, théâtre) sont en première ligne avec le Festival de l'Imaginaire, solidement ancré dans le paysage culturel depuis 1997 dans la suite des activités de la Maison des Cultures du Monde à Paris. Le festival Haizebegui – soutenu par le CNRS – cherche à approcher le monde par la musique. Il prend en charge la question des migrations contemporaines à travers notamment l'orchestre « musiques en migration » qui intègre des migrants échoués à Bayonne. Dans le domaine de l'anthropologie générale, des festivals dédiés ou faisant référence à l'anthropologie sont organisés dans toute la France tels le festival Anthropologia à Bordeaux ou le festival Les Reclusiennes organisé à Sainte-Foy-La-Grande (Nouvelle Aquitaine) qui s'appuie fortement sur l'anthropologie pour aborder des thématiques très contemporaines comme l'écologie ou la mobilité.

On ne saurait oublier le très célèbre Bistrot des Ethnologues qui depuis des années, à Montpellier, favorise également la vulgarisation de notre discipline.

On notera encore, depuis 1996, le festival de philosophie Citéphilo qui se tient à Lille et dans les villes voisines des Hauts de France. Consacré à la vie de la pensée, accueillant une ville, un pays, une idée forte, il s'appuie sur les sciences humaines et sociales et les anthropologues sont invité.es chaque année à dialoguer avec d'autres spécialistes et à communiquer avec un public qui s'élargit. Le thème du festival 2018-2019, « Masculin-Féminin », a rendu hommage à Françoise Héritier, et les anthropologues invitées ont pu discuter des

chantiers qu'elle a ouverts comme du renouvellement de la pensée sur le genre.

4. Production audio-visuelle

L'anthropologie visuelle en France a permis d'assurer une visibilité importante de notre discipline dans un certain nombre de débats en SHS à partir des années 1960 aussi bien au niveau national qu'international notamment par les travaux de Jean Rouch et d'autres cinéastes chercheurs. Ces travaux ont permis d'asseoir la discipline dans des relations structurantes avec d'autres milieux intellectuels, mais aussi avec des institutions culturelles (musées, festivals etc.) permettant à notre discipline d'avoir accès à des publics en dehors du cercle académique.

Le festival des journées du film ethnographique de l'association l'Autre organisé depuis plus de 20 ans par le documentariste Dragoss Ouédraogo et les étudiants du département d'anthropologie de Bordeaux permet également de donner de la visibilité à la discipline et de la sortir « hors les murs » ainsi que de « penser » la restitution des données autrement que dans la sphère académique.

Aujourd'hui, on peut faire le constat qu'il existe plusieurs lieux de formations (niveau master) autour de l'anthropologie visuelle, mais la recherche semble éclatée et peu visible, malgré la richesse des travaux existants. De nombreux anthropologues font usage du film dans leurs travaux et perpétuent cet héritage tout en cherchant à renouveler des questions scientifiques majeures. Le recours au son et à l'image offre en particulier la possibilité de mener une réflexion sur l'usage de la sensorialité dans les enquêtes en sciences humaines et sociales et permet de partager nos connaissances avec un large public. La démocratisation des outils technologiques offre une opportunité sans précédent pour s'emparer de ces écritures pour transmettre et diffuser nos connaissances. En revanche, on peut constater un éclatement des initiatives, malgré l'existence de nombreux travaux dans différentes UMR (CéSor, CNE, CRAL, IDEMEC, IIAC, IRIS,

LESC, URMIS, etc.). Il apparaît indispensable pour notre discipline d'être le moteur d'une nouvelle dynamique pour créer une stratégie inédite – non seulement dans la perspective d'un développement de l'anthropologie visuelle – mais dans la volonté d'établir un dialogue avec l'ensemble des SHS s'intéressant à l'image et au cinéma.

Compte tenu de l'importance de l'image dans les sociétés contemporaines, notre discipline doit à la fois contribuer à un discours critique sur le statut de l'image, mais aussi doit s'emparer de ces modes d'écriture. Elle poursuit un de ces objectifs majeurs consistant à penser la diversité et l'unité de l'activité humaine en donnant à voir et en analysant la complexité de processus culturels d'interdépendance entre les sociétés dans un contexte de mondialisation, mais aussi en contribuant à la connaissance de la diversité des « cultures » dans le monde. On peut mentionner différentes initiatives allant dans ce sens, comme le GDR « *Images, écritures transmédiats et sciences sociales* » qui, sous l'impulsion de chercheurs membres d'UMR travaillant pour différents établissements nationaux actifs dans le domaine de l'image en France (InSHS, AMU, Paris X, EHESS, Evry, Université de Chambéry, Université de Toulouse, Université de Caen, Université de Bordeaux, etc.), vise à organiser chaque année un Salon des écritures transmédiats au MUCEM à Marseille. Ce salon aura lieu dans le cadre du festival Jean Rouch hors les murs, un des festivals les plus importants pour notre discipline aujourd'hui.

Le Festival Jean Rouch est devenu un lieu incontournable d'interactions des SHS avec l'industrie créative (producteurs, éditeurs, diffuseurs). Il n'existe pas de rencontres professionnelles à ce jour permettant de mettre nos chercheurs en interaction avec ce monde professionnel en pleine transformation suite au développement des plateformes numériques. Sans doute serait-il opportun de profiter de l'ouverture du campus Condorcet pour donner une nouvelle impulsion au Festival Jean Rouch et l'ouvrir à un nouveau public. La section 38 de l'InSHS peut donc jouer un rôle moteur au sein de l'Institut pour structurer

cette communauté dont la richesse des travaux est trop souvent méconnue. Dans la même perspective, une stratégie nationale d'incitation pour les chercheur.es à participer davantage aux festivals, aux rencontres sur les sciences, apparaît comme un enjeu majeur pour expliquer en quoi l'anthropologie et d'autres disciplines en sciences humaines et sociales contribuent à comprendre les enjeux sociaux majeurs des sociétés contemporaines et jouent un rôle incontournable dans la Cité.

C. L'anthropologie française dans les réseaux internationaux

La place que l'anthropologie occupe dans l'espace « Enseignement supérieur et Recherche » (ESR) est liée à la manière dont elle est perçue dans le domaine des SHS à l'international ainsi qu'aux évolutions de cet espace ESR – une construction politique européenne du début du ^{xxi}^e siècle – qui affecte la manière dont les anthropologues se forment, accèdent à un emploi et communiquent le fruit de leurs recherches. Or, l'anthropologie n'est pas clairement identifiée dans cet espace en raison de ses liens anciens (^{xix}^e siècle) avec sa discipline mère, la sociologie, et de l'adoption de sa méthode d'enquête (l'ethnographie) par toutes les disciplines qui s'appuient sur la collecte de données empiriques. Elle demeure identifiée à la science des cultures, du patrimoine et de l'exotisme, alors que ces domaines sont profondément remis en question par la mondialisation et que l'étude de ses objets a été, nous l'avons vu, singulièrement renouvelée. Les anthropologues français obtiennent un succès relatif dans les projets financés par le Conseil européen de la recherche en pilotant des projets aux frontières de la connaissance, à base interdisciplinaire. Il faut peut-être tenir compte de ces différents paramètres pour expliquer qu'entre 2008 et 2017, seuls 150 projets de recherche impliquant l'anthropologie ont été financés par l'ANR alors que, depuis 2005, l'agence a soutenu plus de 15 000 projets.

La communication dans les séminaires, les enseignements, les conférences et les congrès internationaux est vitale pour toute discipline scientifique car au moment où la recherche peut être communiquée et discutée, les chercheur.es contribuent à la formation d'une communauté scientifique sans laquelle toute avancée des connaissances n'a pas de sens. Les anthropologues français semblent se caractériser par la densité de leurs circulations dans de nombreux espaces de communication, leurs préférences pour les associations spécialisées sur un domaine de recherche et sur une aire culturelle, et par la faiblesse de leur investissement dans les structures internationales de la discipline. L'Association française des ethnologues et des anthropologues (AFEA) qui avait le projet de rassembler toutes les associations d'anthropologues, généralistes et spécialisées, s'efforce d'organiser un congrès bisannuel, mais peine à rassembler jeunes chercheur.es et aînés ; l'Association européenne des anthropologues sociaux (EASA) ne cesse de réclamer un plus fort investissement des anthropologues français dont la renommée demeure grande, mais ce n'est qu'en 2012 qu'elle a tenu l'un de ses congrès bisannuels en France (à l'Université de Nanterre) ; et son journal *Social Anthropology* qui avait obtenu d'être bilingue (français-anglais) grâce à l'activisme des Français cofondateurs ne reçoit que peu de contributions françaises, que ce soit en français ou en anglais ; l'Association américaine d'anthropologie (AAA) attire de plus en plus d'anthropologues français, comparativement aux années 1990, et cela alimente un usage de plus en plus dominant de la langue anglaise. Entre les deux, la Société canadienne d'anthropologie (CASCA) fait office de corps intermédiaire probablement pour ses pratiques bilingues et son rapprochement de l'AAA avec qui elle tiendra une nouvelle fois son congrès annuel en 2020.

L'internationalisation de l'ESR, espace dans lequel les anthropologues français ont toute leur place, attire l'attention sur la domination qu'y exerce la langue anglaise. Ce fait de pouvoir requiert de la part des anthropologues un effort supplémentaire pour communiquer dans leur langue maternelle, dans la langue des

sociétés avec qui ils et elles travaillent et à qui il est nécessaire de restituer la recherche, et en anglais, langue de sélection et de financement des projets. Sachant que les connaissances qu'ils et elles produisent sont indispensables au maintien de la diversité humaine et culturelle, un investissement fort des pouvoirs publics est requis pour maintenir cet état de tension susceptible de produire les meilleurs résultats : si la formation à l'anglais est une étape, l'aide à la traduction et le soutien des revues francophones sont indispensables à l'entretien d'une pensée originale.

D. Problèmes structurels

Tout comme le mentionne l'ensemble des rapports précédents de la section 38, nous ne pouvons finir cet état des lieux sans nous faire à notre tour l'écho des problèmes récurrents que rencontrent nos UMR. L'insuffisance persistante du personnel d'encadrement à la recherche – amené de surcroît à accomplir des tâches d'un niveau très largement supérieur à celui défini lors de leur recrutement – rend de plus en plus difficile la vie des laboratoires et de plus en plus inconfortable la fonction de directrice et directeur d'unité qui doivent à leur tour assumer des tâches qui ne relèvent ni de leur fonction ni de leur compétence. Les *burn out*, les crises d'angoisse et les arrêts maladies se multiplient, une situation difficile qui n'encourage les chercheur.es ni à prendre des responsabilités, ni à entreprendre des projets ANR ou ERC. La très grande majorité des doctorants ne sont pas financés, ce qui double leur temps de thèse. Par ailleurs, n'étant pas financés, ils n'entrent pas dans le calcul du budget que reçoit leur laboratoire. Celui-ci, s'il veut les aider à financer leurs déplacements sur le terrain, le fait donc en sacrifiant d'autres dépenses nécessaires à son fonctionnement. Notons encore que les possibilités d'évolution de carrière sont insuffisantes même si l'on peut se réjouir du rajeunissement de l'âge moyen de passage en DR2. Le nombre d'anthropologues DR1 et DRCE, très bas, et en dessous du niveau

moyen des instituts du CNRS, se féminise lentement. On peut enfin regretter le très faible recrutement d'anthropologues étrangers, en dehors des Italiens. Le manque d'attractivité des salaires en est sans doute en partie responsable.

Au-delà du nombre de chercheurs et d'enseignants dont le recrutement n'est pas à la hauteur des besoins constatés dans l'enseignement supérieur, ni suffisant pour garantir la pérennité de domaines complets de recherche ou pour inclure tous les jeunes docteurs dans la communauté scientifique, nous constatons une modification radicale des manières d'entrer dans le métier et de l'exercer. La plupart des recrutements sont conditionnés à l'exercice d'emplois précaires, à valeur ambiguë. L'obtention d'un post-doctorat d'un an renouvelable (forme noble de la précarité) permet au jeune anthropologue, au-delà du salaire qui l'accompagne, de poursuivre ses recherches et de les enrichir dans un milieu souvent distinct de celui dans lequel a été réalisée la thèse. Mais le statut de post-doc, devenu atout, se convertit peu à peu en critère d'évaluation de la qualité du ou de la chercheur.e, jusqu'alors apprécié.e par rapport à la thèse et aux contributions scientifiques. À côté de ces jeunes chercheur.es porté.es par l'espoir, et obligé.es de renouveler continuellement leurs perspectives de recherche pour avoir une chance de s'ajuster à la loi du marché, les chercheur.es et enseignant.es chercheur.es confirmé.es par un statut dans un EPST ou une université voient leurs conditions de travail bouleversées par la baisse des crédits récurrents des équipes et la quête continue de financement pour les projets qu'ils portent. Si l'obtention d'un projet ANR ou ERC devient un signe de distinction, le passage par des modes

de sélection plus ou moins transparents mais aussi la convergence des organes scientifiques et financeurs deviennent le moyen d'orienter les recherches à des fins « plus utilitaires ». Cela nous alerte car s'il est important de répondre à la demande sociale, la demande politique est prisonnière d'exigences difficilement compatibles avec la temporalité d'une bonne recherche, laquelle n'est pas nécessairement celle qui sera la plus médiatisée.

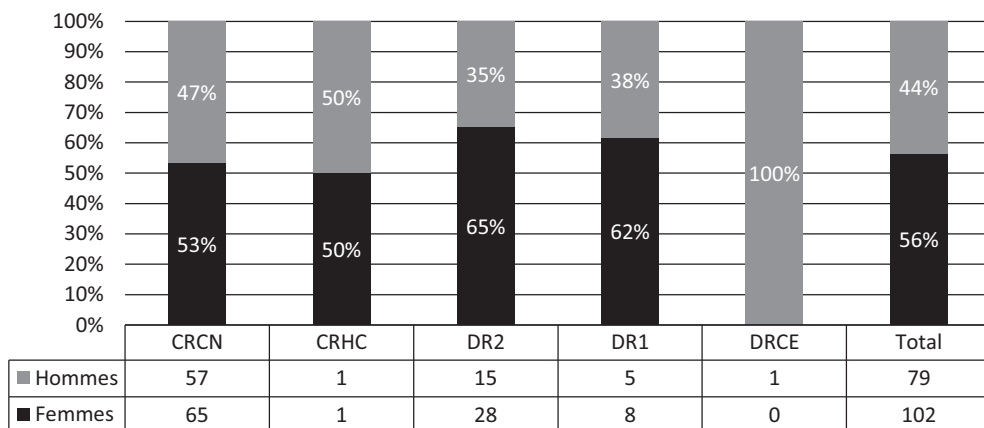
Conclusion

Prenant appui sur tout ce qui précède, on ne manquera pas de souligner la capacité de notre discipline à se renouveler constamment avec un dynamisme que l'on retrouve dans la créativité des projets de recherche que la section évalue. Elle a prouvé sa capacité à se frotter aux questions qui touchent les sociétés les plus modernes, en lien avec le religieux, le politique, la parenté, le genre, la relation homme/environnement, les migrations, la globalisation ou la violence : autant de thématiques qui traitent d'enjeux fondamentaux pour la société et questionnent à nouveau frais le rapport à l'autre au cœur des objectifs de l'anthropologie, dont l'approche est constamment sollicitée par les autres disciplines. La section ne peut donc que se réjouir que l'anthropologie fasse partie des priorités de l'InSHS et souhaiterait que cela se traduise de façon plus visible dans les moyens qui lui sont alloués.

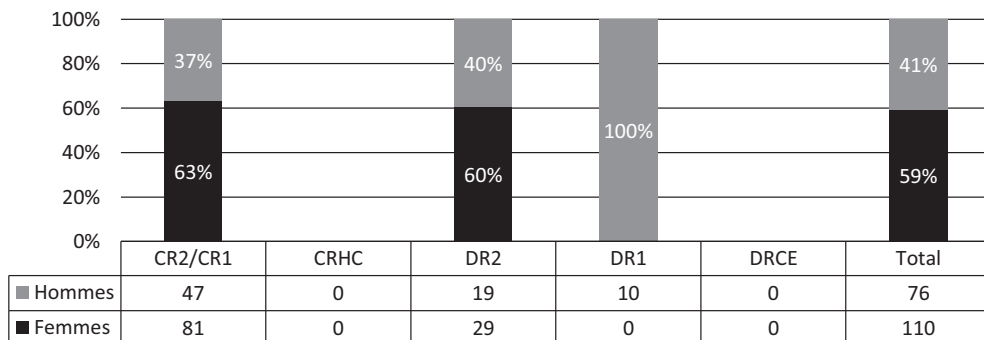
ANNEXE 1

Indicateurs d'égalité entre les chercheuses et les chercheurs

**Proportion de femmes et d'hommes par grade
situation au 20/11/2018**



**Proportion de femmes et d'hommes par grade
situation au 31/12/2007**



Source pour 2007 : la parité dans les métiers du CNRS 2007-2008

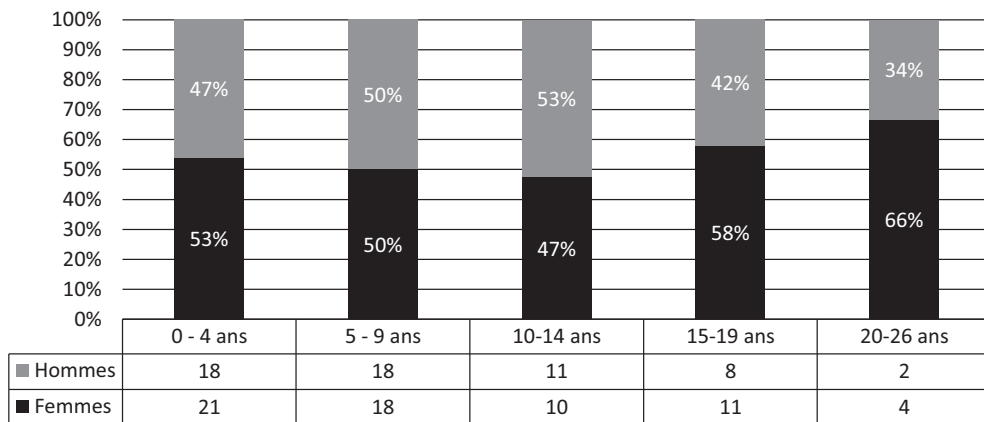
Indice d'avantage masculin 2018 = 0,75 (en 2011 = 1,1)⁽²⁾

L'indice d'avantage masculin est défini comme le ratio entre la proportion de directeurs de recherche parmi les chercheurs et la proportion de directrices de recherche parmi les chercheuses. Cet indicateur reflète de manière globale

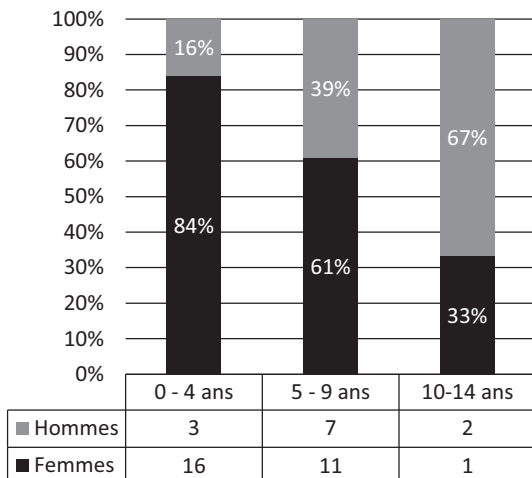
les différences de progression de carrière entre femmes et hommes. Un indice d'avantage masculin supérieur à 1 signifie que la proportion relative d'hommes promus DR est supérieure à celle des femmes.

Ancienneté dans le grade – novembre 2018

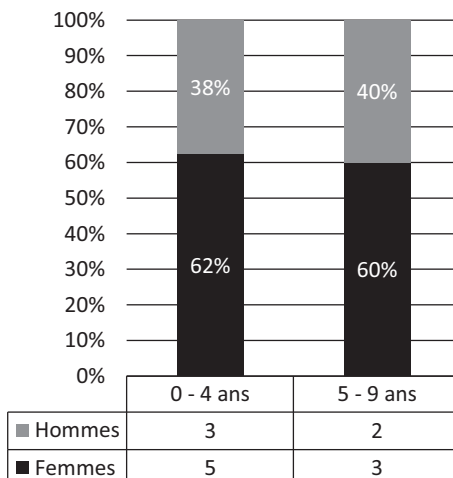
**Ancienneté dans le grade CR
situation 11/2018**



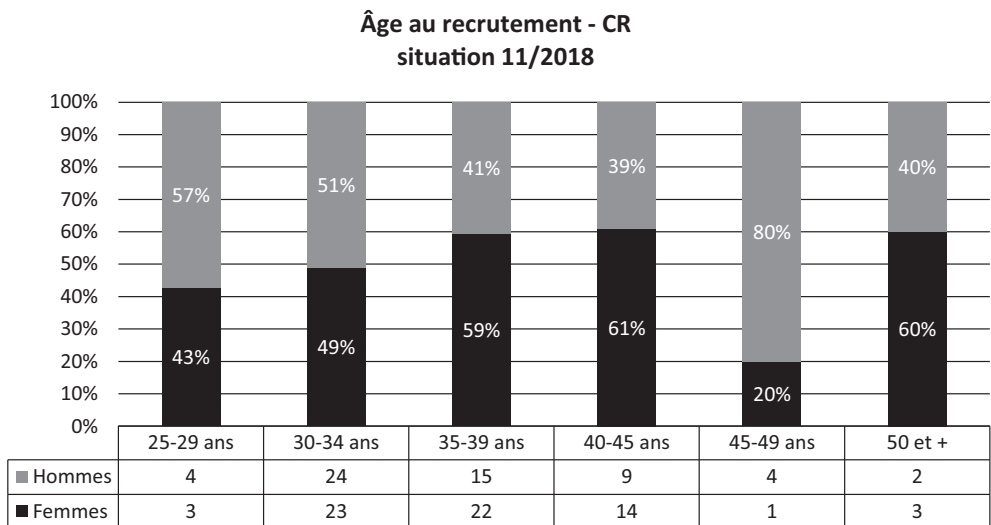
**Ancienneté dans le grade DR2
situation 11/2018**



**Ancienneté dans le grade DR1
situation 11/2018**



Âge au recrutement CR – novembre 2018



Concours Chargé-e de recherche

Concours CR 2019

CANDIDATURES

■ Femmes ■ Hommes



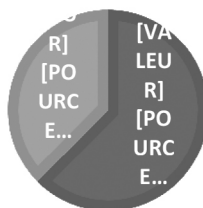
AUDITIONS

■ Femmes ■ Hommes



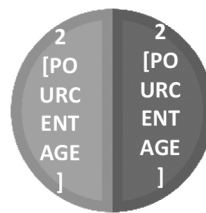
CLASSE.ES

■ Femmes ■ Hommes



RECRUTE.ES

■ Femmes ■ Hommes



Concours CR 2017 et 2018 (cumulés)

CANDIDATURES

■ Femmes ■ Hommes



AUDITIONS

■ Femmes ■ Hommes



RECRUTEMENTS

■ Femmes ■ Hommes



Concours CR2/CR1 2008

CANDIDATURES

■ Femmes ■ Hommes



RECRUTEMENTS

■ Femmes ■ Hommes

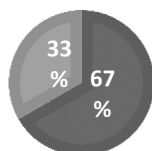


Source pour 2008 : la parité dans les métiers du CNRS 2007-2008

Concours DR2

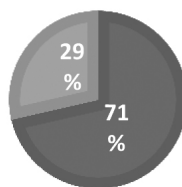
CANDIDAT-E-S 2019

■ FEMMES ■ HOMMES



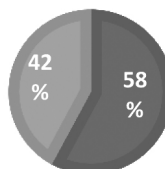
CLASSE-ES 2019

■ FEMMES ■ HOMMES



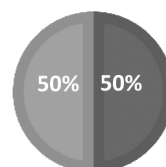
CANDIDAT-E-S 2018

■ FEMMES ■ HOMMES



LAUREAT-E-S 2018

■ FEMMES ■ HOMMES

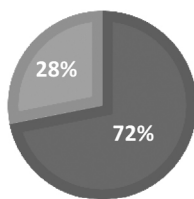
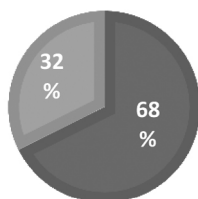


**CANDIDAT-E-S
2004-2011**

**LAUREAT-E-S
2004-2011**

■ FEMMES ■ HOMMES

■ FEMMES ■ HOMMES



Promotions DR

2018	DR2 → DR1			DR1 → DRCE			Total avancements		
	F	H	%F	F	H	%F	F	H	%F
Candidat-e-s	5	5	50%	1	1	50%	6	6	50%
Classé-e-s	3	2	60%	1	0	100	4	2	66%

Cumulées 2016-2017	DR2 → DR1			DR1 → DRCE			Total avancements		
	F	H	%F	F	H	%F	F	H	%F
Candidat-e-s	13	9	59,1	4	2	66,6	17	11	60,7
Classé-e-s	6	4	60,0	3	0	100	9	4	69,2
Promu-e-s	3	2	60,0	0	0	0	3	2	60,0

Cumulées 2004-2011	DR2 → DR1			DR1 → DRCE			Total avancements		
	F	H	%F	F	H	%F	F	H	%F
Candidat-e-s	69	42	62,2	4	41	8,9	73	83	46,8
Promu-e-s	8	9	47,1	0	2	0	8	11	42,1

Source pour 2004-2011 : Mission pour la place des femmes au CNRS,
Fiche « Indicateurs d'égalité entre les chercheuses et les chercheurs.
Données section 38 mandats 2004-08 et 2008-12 ».

Distinctions du CNRS : médailles de 2004 à 2018

OR		ARGENT		BRONZE		TOTAL		% F
F	H	F	H	F	H	F	H	
0	1	2	0	8	7	10	8	55,5%

Source : Site web du CNRS – Rubrique «les talents et les distinctions»

Composition des membres de la section – Évolution

	DR/PU			CR/MCF			IT			TOTAL			Présidente	Secrétaire
	F	H	% F	F	H	% F	F	H	% F	F	H	% F	F	F
1996	/	/	/	/	/	/	/	/	/	6	15	28,6	0	1
2007	4	7	36,3	4	3	57,1	2	1	66,7	10	11	47,6	1	1
2008-2012	5	6	45,5	5	2	71,4	2	1	66,7	12	9	57,1	1	1
2012-2016	4	4	50,0	5	5	50,0	3	0	100,0	12	9	57,1	0	1
2016-2019	6	5	54,5	4	3	57,1	2	1	66,7	12	9	57,1	1	1

Source : pour 1996 : rapport de conjoncture ; pour 2007 : la parité dans les métiers du CNRS 2007-2008 ; pour 2008-2016 : Mission pour la place des femmes au CNRS, Fiche «Indicateurs d'égalité entre les chercheuses et les chercheurs. Données section 38 mandats 2004-08 et 2008-12».

Répartition des chercheurs de la section 38 en activité, par grade et en comparaison avec l'ensemble des chercheurs du CNRS

Notes

(1) On pourra consulter ces critères à l'adresse suivante : http://www.inshs.cnrs.fr/sites/institut_inshs/files/download-file/criteres-eligibilite-revue_0.pdf.

(2) Sources : Mission pour la place des femmes au CNRS, Fiche «Indicateurs d'égalité entre les chercheuses et les chercheurs. Données section 38 mandats 2004-08 et 2008-12», p. 85.

Grade	Section 38	Ensemble du CNRS
DRCE	1 (0,5%)	265 (2,3%)
DR1	11(5,8%)	1 676 (14,9%)
DR2	47 (24,8%)	3 172 (28,25%)
CRCH	4 (2,0%)	235 (2%)
CRCN	126 (66,6%)	5 878 (52,3%)
TOTAL	189 (100,0%)	11 226 (100,0%)

SECTION 39

ESPACES, TERRITOIRES ET SOCIÉTÉS

Composition de la section

Olivier COUTARD (président de section), Gülçin ERDI (secrétaire scientifique jusqu'en juillet 2020), Brice ANSELME, Nathalie BLANC, Sabinie BOGNON (à partir de janvier 2020), Rachele BORGHI (jusqu'en avril 2019), Livio DE LUCA, Christophe ENAUX, Jean-Christophe FOLTETE, Eric FOULQUIER, Véronique GINOUVÈS, Christine LAMBERTS, Nicole LOMPRÉ, Nathalie LONG, Sophie MASSON, Matthieu NOUCHER (secrétaire scientifique à partir d'août 2020), Anthony PECQUEUX, Lena SANDERS, François TAGLIONI, Patrick TAILLANDIER, Jean-Paul THIBAUD, Céline VACCHIANI-MARCUZZO.

Introduction

La communauté scientifique pluridisciplinaire de la section 39 étudie la dimension spatiale des phénomènes sociaux en mettant en lumière les agencements spatiaux et les relations dans l'espace, ainsi que les échelles et les temporalités des dynamiques associées. Elle éclaire ainsi, réciproquement, l'organisation, le fonctionnement et l'évolution des territoires en prenant en compte la complexité des sociétés humaines et des formes de leur inscription dans l'environnement à toutes les échelles spatiales.

Le présent rapport de conjoncture a été élaboré par la commission de la section à partir de ses propres observations (évaluation des chercheurs et des chercheuses⁽¹⁾ du CNRS relevant de la section, évaluation des structures de recherche associées au CNRS, travaux des

jurys d'admissibilité de la section pour les concours CR et DR...), d'un ensemble de données statistiques provenant principalement de la DRH du CNRS et d'une enquête réalisée auprès de la communauté scientifique de la section (cf. encadré 1).

Encadré 1 : Enquête auprès de la communauté scientifique de la section 39.

Un questionnaire en ligne a été diffusé entre le 2 décembre 2018 et le 9 janvier 2019 afin d'interroger les collègues relevant du champ de la section 39 (mais pas nécessairement personnels du CNRS). Il portait sur l'évolution des conditions de production de la recherche (organisation, financement, évaluation, infrastructure) et des orientations scientifiques (thématiques, terrains, échelles, approches, méthodes, données). Parmi les 184 réponses exploitables reçues, 5 provenaient de collectifs (GdR, UMR, groupe intra-UMR...). Les résultats ont été présentés et discutés lors de l'Assemblée générale extraordinaire du 20 mai 2019.

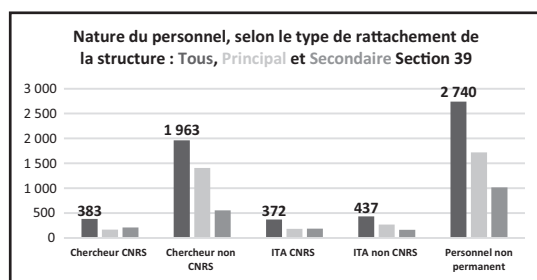
Structures et personnel de recherche

Unités de recherche : démographie, statuts, disciplines⁽²⁾

Le périmètre de la section, pris au sens large (ensemble des structures de recherche ou de service rattachées à titre principal ou secondaire), comporte 77 structures : 38 UMR, 1 UMI, 1 UPR, 21 USR, 3 UMS, 5 FR, 5 GDR et 3 FRE.

La composition démographique de cet ensemble est synthétisée dans le graphique suivant.

Graphique 1 : Personnels des structures rattachées à la section 39 à titre principal ou secondaire. Effectif total : 5 895 (principal : 3 755 ; secondaire : 2 140)



Ce graphique est indicatif car certains personnels sont comptés plusieurs fois (responsables d'un GDR qui sont déjà décomptés comme membres d'une unité par exemple) et le nombre d'ingénieurs statutaires est sans doute surévalué (certains ingénieurs contractuels semblant décomptés comme des personnels permanents). Il met cependant en évidence le poids relatif faible des chercheur.e.s CNRS parmi l'ensemble des personnels (6,5 %) et même parmi l'ensemble des personnels chercheur.e.s et enseignant.e.s-chercheur.e.s permanents (16,3 %) des structures rattachées à la section. La comparaison avec les données

des deux précédents rapports de conjoncture montre également une croissance importante des effectifs de personnels permanents (cf. tableau), qui s'explique sans doute principalement par l'accroissement du périmètre des UMR (intégration de nouvelles équipes). La croissance disproportionnée des « autres personnels ITA » ne relève cependant pas de la même explication (cf. *infra* l'analyse détaillée pour les 26 UMR rattachées à titre principal à la section 39).

Tableau 1 : Effectifs de personnels permanents des structures de recherche rattachées à la section 39 (périmètre large).

	2010	2014	2019	2019/ 2010
Nombre de structures (hors UMS)	73	74	77	+ 5 %
Chercheur.e.s CNRS	280	327	383	+ 37 %
Ens.-ch. et autres chercheur.e.s	1359	1768	1963	+ 45 %
Ratio Ch. CNRS/ total EC+Cb.	0,17	0,17	0,16	—
IT CNRS	260	352	372	+ 43 %
Autres personnels ITA	161	371	437	+ 171 %
Ratio Ch. CNRS/ IT CNRS	0,93	1,08	0,97	—
Ratio total EC+Cb/ total ITA	3,89	2,90	2,90	—
Effectif total de personnels permanents	2060	2818	3155	+53 %

Source : extraction de la base Zento, mai 2019. NB : Les effectifs de personnels non permanents sont trop incertains pour pouvoir mener une étude statistique significative.

Parmi ces 77 structures, 39 sont rattachées à la section 39 à titre principal : 26 UMR (cf. encadré 2), 1 UMI, 7 USR (dont 2 MSH et 5 UMIFRE), 1 UMS, 3 FR et 1 FRE (unité en cours de désassociation du CNRS). Depuis 2010, deux unités ont été désassociées (ENEC, GREMMO) et

deux nouvelles unités ont été associées (LIED, TETIS).

Les effectifs permanents des 26 UMR sont les suivants (entre parenthèses, l'évolution par rapport à 2014) : 157 chercheur.e.s CNRS (+ 20), 154 IT CNRS (- 18), 1 324 enseignant.e.s-chercheur.e.s et chercheur.e.s d'autres organismes

(+ 126), et 199 personnels ITA non CNRS (+ 88) (sources : extraction de la base Zento, mai 2019 ; rapport de conjoncture 2014 de la section). La tendance est donc à une croissance modérée, sauf pour les IT CNRS dont le nombre diminue et le taux chercheur.e.s CNRS/IT CNRS qui augmente (il passe de 0,80 à 1,02).

Encadré 2 : UMR rattachées à titre principal à la section 39 (décembre 2019).

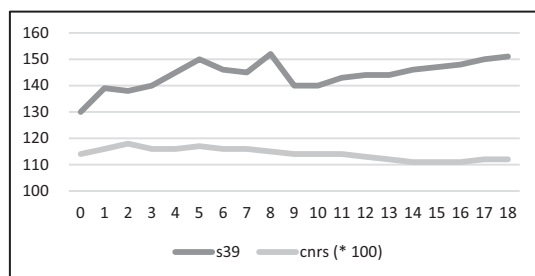
UMR1563	AAU	Ambiances Architectures Urbanités
UMR3329	AUSSER	Architecture Urbanisme Société : Savoirs, Enseignement, Recherche
UMR3495	MAP	Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine
UMR5193	LISST	Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires
UMR5281	ART-Dev	Acteurs, Ressources et Territoires dans le Développement
UMR5319		Passages
UMR5593	LAET	Laboratoire Aménagement, Économie, Transport
UMR5600	EVS	Environnement, Ville, Société
UMR5602	GEODE	Géographie de l'environnement
UMR6049	ThêMA	Théoriser et Modéliser pour Aménager
UMR6240	LISA	Lieux, Identités, eSpaces, Activités
UMR6266	IDEES	Identité et Différenciation de l'Espace, de l'Environnement et des Sociétés
UMR6554	LETG	Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique
UMR6590	ESO	Espaces et Sociétés
UMR7218	LAVUE	Laboratoire Architecture, Ville, Urbanisme, Environnement
UMR7227	CREDA	Centre de Recherche et de Documentation des Amériques
UMR7300	ESPACE	Etudes des Structures, des Processus d'Adaptation et des Changements de l'Espace
UMR7301	MIGRINTER	Migrations Internationales, Espaces et Sociétés
UMR7324	CITERES	Cités, Territoires, Environnement et Sociétés
UMR7362	LIVE	Laboratoire Image, Ville, Environnement
UMR7533	LADYSS	Laboratoire dynamiques sociales et recomposition des espaces
UMR8134	LATTS	Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés
UMR8236	LIED	Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain
UMR8504		Géographie-cités
UMR8586	PRODIG	Pôle de Recherche pour l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique
UMR9000	TETIS	Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale

Population de chercheur.e.s : effectifs, recrutements

La section 39 est la plus petite section du CNRS : au 31 décembre 2018, 151 chercheur.e.s en relèvent (contre 448 en section 1, la plus importante, et 272 chercheur.e.s par section en moyenne). L'évolution démographique de la section est plutôt favorable. En 10 ans (2009-2018), dans un périmètre disciplinaire stable, les effectifs de chercheur.e.s CNRS se sont accrus de 8%, passant de 140 à 151, alors que les effectifs totaux de chercheur.e.s de l'organisme restaient stables (11 433 en 2009, 11 226 en 2018).

La section est par ailleurs (fin 2018) l'une des sections dans lesquelles le taux de chercheur.e.s de plus de 55 ans est le plus faible (22,5%, contre 29,8% pour l'ensemble du CNRS). Il en résulterait un taux de renouvellement faible dans les 10 ans qui viennent si le nombre de recrutements annuels au CNRS devait rester calé sur le nombre de départs en retraite comme c'est actuellement le cas.

Graphique 2 : Évolution de la population des chercheur.e.s relevant de la section (2000-2018).



Source : Bilan social et parité 2018 (tableau P05).

En termes de répartition géographique, un tiers des chercheur.e.s de la section sont affectés en Île-de-France, deux tiers dans les autres régions, sans prédominance forte des sites IDEX/ISITE.

Concours CR

Durant la décennie 2010-2019, la section 39 a recruté 52 chargé.e.s de recherche (CR2, CR1 et CRCN confondus), auxquels se sont ajoutés deux DR externes. Le nombre de recrutements de CR a oscillé d'une année à l'autre, entre 3 (en 2019) et 8 (en 2011 et 2012). Au-delà des fluctuations interannuelles, la tendance globale est à la baisse, avec 30 recrutements pour la période 2010-2014 et 22 pour 2015-2019, soit une baisse de 27%. L'équilibre entre les genres a aussi évolué, au profit des lauréates (elles représentaient 43% des recrutements pour la première période et 68% pour la seconde).

En termes de répartition géographique des affectations, le flux (recrutements entre 2010 et 2019) se répartit de manière comparable au stock (ensemble des chercheur.e.s de la section) : un tiers des chercheur.e.s en Île-de-France, deux tiers dans les autres régions françaises. La géographie des affectations correspond logiquement à celle des UMR de la section ; mais elle reflète peu celle des IDEX/ISITES qui n'absorbent pas la plupart des recrutements comme c'est le cas dans d'autres domaines de recherche.

En termes de thématiques, un peu plus d'un poste sur trois a été colorié (19 postes sur 52). Le nombre de coloriage varie un peu d'une année à l'autre (par exemple, il n'y en a pas eu en 2014, année où 5 chercheur.e.s ont été recrutés, alors qu'en 2011 4 postes ont été concernés, soit la moitié des postes ouverts au concours cette année-là). Ces coloriages sont de nature diverse. En simplifiant, on peut distinguer trois logiques :

- coloriage reprenant les mots-clés de l'intitulé de la section 39 en y associant une « aire culturelle ». Tel a été le cas entre 2012 et 2017, années au cours desquelles ont été affichées successivement l'Asie, l'Amérique du nord, les Amériques, l'Afrique (ces deux dernières la même année), l'Asie à nouveau et enfin l'aire Pacifique. Ces coloriages ont été satisfaits ;

- coloriage (et parfois fléchage) proposé par l'INEE, en début de période, sur des thématiques liées au paysage, aux socioécosystèmes ou à la biodiversité ;

Tableau 2 : Répartition des recrutements aux concours CR CNRS de la section 39 sur la période 2009-2019 pour les affectations dans les unités relevant à titre principal de la section.

5 recrutements	4 recrutements	3 recrutements	2 recrutements	1 recrutement	
Passages (dont 2 Adess et 1 Set)	Géographie-cités LETG Migrinter Prodig	Citeres	ART-Dev Ambiances Espaces Ladyss Latts Lisst	Ausser ESO EVS Geode Idees	Lavue Liens Live Thema

– coloriage centré sur des approches spécifiques, qu'il s'agisse de méthodologie (ainsi, trois coloriations se réfèrent à des approches modélisatrices), de thématiques particulières (mobilités et migrations, santé, genre), ou encore de domaines de recherche plus larges comme « études urbaines », domaine auquel l'ensemble des recrutements opérés en 2017, par exemple, pouvait être associé.

En termes d'affectation enfin, 7 recrues (13%) ont été affectées dans 5 unités ne relevant pas à titre principal de la section 39. 45 l'ont été dans 21 unités de la section (cf. tableau ci-dessous). 7 unités rattachées à titre principal à la section pour tout ou partie de la période 2010-2019 n'ont donc bénéficié d'aucun recrutement sur la période : les deux unités désassociées (ENEC, GREMMO), les deux unités nouvellement rattachées (LIED, TETIS), ainsi que le CREDA, le LAET et le laboratoire MAP.

Ingénieur.e.s et technicien.ne.s : arrivées, départs, mobilités

Effectifs : évolution 2014-2019

Pour les IT CNRS en 5 ans on observe une baisse de 9% des effectifs dans les UMR, pour lesquels l'évolution du portefeuille d'UMR ne joue pas significativement. Pour les effectifs IT non CNRS (universités, grandes écoles...), le tableau fait apparaître une forte hausse qui résulte de plusieurs facteurs :

– une augmentation forte des effectifs IT non CNRS dans trois UMR, due notamment à une évolution du contour de ces UMR (+ 58)

– une augmentation liée à l'association de deux UMR avec un personnel IT non CNRS relativement nombreux (+29)

– peut-être des effectifs surévalués (comptant chaque IT pour une personne alors que les postes d'IT non CNRS sont souvent mutualisés entre plusieurs structures).

Si on retire ces 5 unités du périmètre, on note une stabilité des effectifs des IT non CNRS, une légère baisse des effectifs totaux d'IT (- 6%), analogue à la tendance observée pour les IT CNRS, et donc un ratio IT/chercheur.e.s qui diminue également.

	2014	2019	2019/ 2014
ITA CNRS	169	154	- 9%
ITA non CNRS	111	199	+ 79%
Total IT UMR	280	353	+ 26%
<i>ITA CNRS (Périmètre 21 UMR*)</i>	<i>166</i>	<i>153</i>	<i>- 8%</i>
<i>ITA non CNRS (périmètre 21 UMR*)</i>	<i>97</i>	<i>95</i>	<i>- 2%</i>
Total IT (périmètre 21 UMR*)	263	248	- 6%

* Deux périmètres distincts sont considérés dans ce tableau :

- l'ensemble des 26 UMR relevant de la section 39 à titre principal ;
- un périmètre de 21 UMR ne comportant ni les deux unités désassociées durant la période (3 IT CNRS), ni les deux unités nouvellement associées durant la période (1 IT CNRS, 29 IT non CNRS), ni trois unités ayant connu une augmentation atypique du nombre d'IT (respectivement +35, +13 et +10, soit +58), liée à une croissance de l'UMR hors SHS ou à l'intégration dans le périmètre de l'UMR d'une entité comportant des effectifs IT importants (équipe INRAP et équipe CICRP respectivement).

Flux

Les flux entrants d'IT sont pourvus par deux voies : la mobilité (intra-CNRS et inter fonctions publiques) et le concours externe. 18 postes au concours externe IT ont ainsi été ouverts depuis 2013 (6 en BAP D, 5 en BAP J, 4 en BAP F, 2 en BAP E et 1 en BAP A) pour les 28 unités rattachées à titre principal à la section 39 pour tout ou partie de la période considérée (entre 1 et 5 postes selon les années). 11 unités sur 28 ont bénéficié d'un ou deux concours IT sur la période.

Seule la campagne de mobilité (NOEMI et FSEP) d'hiver permet un flux d'entrants dans les unités de la 39. Depuis 2016, plus aucun poste n'est ouvert à la mobilité de printemps, dite «NOEMI de compensation»; les unités connaissant un départ d'IT en mobilité doivent par conséquent attendre un an avant une éventuelle arrivée en mobilité d'un nouvel agent. 52 postes ont été attribués aux 28 unités depuis 2013 (de 6 à 12 postes selon les années). 24 unités à titre principal 39 (sur 28) ont bénéficié d'un à six postes en mobilité sur la période. Depuis 2014, le nombre de postes ouverts à la mobilité connaît une diminution; la mise en place du dispositif FSEP n'a pas accru le nombre de postes ouverts à chaque campagne dans les 27 unités, peut-être a-t-elle simplement atténué la baisse. Il est à noter que l'INEE recourt davantage aux FSEP qu'aux NOEMI pour ses unités.

Organisation et financement de la recherche : évolutions récentes

Organisation

La majorité (14) des 26 UMR rattachées à titre principal à la section 39 sont multisites⁽³⁾ (cf. tableau). Celles-ci ont souvent une orga-

nisation réticulaire, propice à une synergie d'objets et méthodes de recherche à l'échelle de l'unité. Ces unités valorisent une identité propre bâtie sur des affinités thématiques ou problématiques. Leur organisation permet de s'affranchir des seules logiques de site et favorise un renouvellement des thématiques ou des approches en s'appuyant sur la créativité des réseaux de recherches ainsi constitués.

Tableau 4 : Effectifs d'UMR selon le nombre de sites sur lesquels elles sont réparties

Nombre de sites	Île-de-France	Autres régions	Total
1	3	9	12
2	2	2	4
3	1	2	3
4	2	1	3
5	0	1	1
6	0	2	2
10	0	1	1
Total général	8	18	26

Financement

Le financement de la recherche comporte deux volets : (1) la dotation de base, qui comprend à la fois les coûts de mise à disposition et de fonctionnement des locaux (et dans certains cas d'infrastructures de recherche), la masse salariale des personnels statutaires (et dans certains cas de quelques personnels contractuels) et les crédits de fonctionnement de base ; (2) les ressources propres (recherche contractuelle notamment) d'autre part. On examine ici l'évolution des conditions de financement des unités en s'intéressant notamment aux crédits de fonctionnement.

Le principe d'évaluation par vagues successives ne permet pas d'avoir une chronique continue des financements obtenus pour l'ensemble des 26 unités rattachées principalement

à la section 39 sur la période 2011-2017. Néanmoins, en s'appuyant sur les chiffres fournis par les unités⁽⁴⁾ dans le cadre des rapports HCERES, il est possible d'apporter quelques éléments à la réflexion. Un premier constat concerne la faiblesse relative de la dotation de base (CNRS et autres tutelles) en crédits de fonctionnement : elle représente 29 % en valeur moyenne et 26 % en valeur médiane du budget des unités. La tendance au financement de la recherche par contrat se consolide. Cependant de fortes différences existent au sein de la section : pour deux unités, la dotation de base constitue plus de 60 % de leur budget quand pour huit autres, au contraire, elle en constitue moins de 20 %.

Le deuxième constat porte sur l'évolution contrastée des dotations : la moitié des unités de la section enregistre une diminution de leur dotation de base sur la période, de l'ordre de 15 % en moyenne, tandis que l'autre moitié connaît une augmentation, de l'ordre de 20 % en moyenne. Deux unités sont concernées par des chutes brutales de leur crédits de fonctionnement (entre 30 et 40 %) ; une autre connaît au contraire une augmentation de 38 %. En outre les trajectoires de dotation des différentes tutelles sont diverses : certaines unités connaissent une contraction de l'ensemble de leurs dotations de base ; d'autres voient toutes leurs dotations augmenter ; d'autres encore voient leur dotation CNRS diminuer, mais celle des autres tutelles augmenter, ou inversement. Faute d'investigations plus approfondies, il est difficile d'interpréter ce constat : effet des politiques de sites ? absence de coordination entre tutelles ? politique globale des tutelles ou mesures ciblées sur certaines unités ?

En matière de recherche contractuelle, la section se caractérise par une multiplicité de sources de financement provenant de guichets divers. Outre l'ANR (et quelques lauréates et lauréats de l'ERC), les travaux de recherche

de la section 39 se caractérisent en effet par un spectre très large de financeurs. Les problématiques d'interface espaces/territoires/sociétés conduisent souvent au déploiement d'une recherche ancrée socio-spatialement et à des partenariats avec des acteurs territoriaux de nature et d'échelle très différents. Cette configuration demande d'apporter une attention particulière aux liens entre activités de recherche, d'étude et d'expertise qui peuvent évidemment être articulées mais qui doivent être distinguées. Notons enfin l'importance croissante d'effets de sites qui conduisent à une différenciation de plus en plus marquée dans les possibilités d'accès aux financements : sites labellisés IDEX/ISITE ou pas ; présence ou absence de Labex ; dispositifs locaux spécifiques (par exemple les DIPEE mis en place par l'INEE) ; politiques régionales de soutien à la recherche...

En matière de locaux, le dernier rapport de conjoncture (2014) notait une inquiétude liée aux fusions d'universités. Si ce processus conduit en général à l'amélioration des conditions d'hébergement des unités, les mutualisations qu'elles sous-tendent soulèvent un certain nombre de problèmes, par exemple quant aux modalités d'accès aux fonds documentaires non numérisés (cf. par exemple les débats autour de la constitution du « Grand équipement documentaire » du campus Condorcet, etc.). Ces conditions d'accueil relèvent pour l'essentiel des universités ; les difficultés financières de certaines grèvent indéniablement les budgets consacrés à leur entretien. Dans la période récente, l'agenda d'investissement public dans les universités a concouru au renforcement des inégalités en matière de conditions d'accueil. Reste à voir quelles seront les conséquences à cet égard du volet « immobilier universitaire » du plan de relance en gestation à l'été 2020.

Encadré 3 : Le campus Condorcet, nouvelle composante du paysage de la recherche en IDF.

L'installation d'un nombre important de laboratoires sur le campus Condorcet à la rentrée 2019 contribue à redessiner sensiblement le paysage de la recherche en sciences humaines et sociales à l'échelle francilienne. Cette volonté de créer un campus de recherche en SHS au nord de Paris (comme le développement du pôle de Saclay au sud) répond à une volonté d'ancrer la recherche à l'échelle du Grand Paris. Une soixantaine d'unités de recherche se sont donc installées dans de nouveaux locaux, sur le site d'Aubervilliers. C'est notamment le cas pour pour une partie au moins des effectifs de quatre unités relevant à titre principal de la section : le Creda, Géographie-Cités, le Ladyss et Prodig.

Cette nouvelle configuration, souhaitée ou subie selon les personnels, est encore à ses prémices et cette première année a été fortement bouleversée par les grèves de transport l'hiver et le confinement au printemps, ce qui ne permet qu'un bilan très incomplet. Les principaux changements concernent de prime abord les conditions de travail (disponibilités de vastes locaux, présence du GED – grand équipement documentaire, etc.). A cela s'ajoute une proximité géographique entre les laboratoires de recherche qui devrait être à moyen terme très positive en termes d'interactions, renforçant ainsi certains liens déjà tissés au sein du labex DynamiTe. L'arrivée progressive des étudiants sur le campus (notamment avec l'installation de nombreux masters) sera renforcée par l'ouverture du site universitaire de La Chapelle (horizon 2022-23) avec le déplacement des premiers cycles universitaires depuis Tolbiac. Cette co-présence entre formations et laboratoires, encore incomplète, représente un réel enjeu pour la réussite du Campus.

En effet, à ce jour, la question de l'accessibilité (notamment pour les personnels IT) et les distances à parcourir entre lieux d'enseignement et de recherche (pour les chercheur.e.s et enseignements-chercheur.e.s) apparaît comme un frein à la cohésion du site. Ceci est de plus renforcé par un contexte de croissance du télétravail des personnels des unités, qui risque d'affaiblir les effectifs au quotidien sur place.

Conditions de travail : éclairage de l'enquête conduite auprès de la section

L'enquête réalisée auprès de la communauté scientifique de la section apporte des éclairages utiles sur les conditions de travail et leur évolution. D'une manière générale, les répondant.e.s à l'enquête considèrent que les conditions de réalisation de leurs recherches ont évolué de manière significative ces dernières années, dans un sens qui n'est considéré comme positif que par une faible proportion des répondants. La course imposée aux financements, la démultiplication des tâches administratives, la mise en concurrence des collègues entre eux dans tous les domaines et l'importance croissante des situations de précarité sont autant d'évolutions qui ont profondément modifié le travail au quotidien.

Interrogés plus précisément sur les évolutions du financement de la recherche, les répondant.e.s condamnent nettement les injonctions à construire des consortiums toujours plus grands, toujours plus complexes à animer, ou le principe des « résultats attendus » inhérent aux appels à projet qui ne laisse fina-

lement que peu de place à la surprise, au hasard (sérendipité) et à la créativité. Certain.e.s soulignent les effets délétères de la généralisation du financement de la recherche par appels à projet. En effet, de petits financements sont parfois suffisants pour démarrer une recherche nouvelle susceptible de mener éventuellement à un projet plus conséquent. Surtout, ce fonctionnement de la recherche oblige à consacrer un temps important à la recherche de micro-financements pour couvrir des activités de base (participation à un séminaire ou à un comité de rédaction par exemple). En outre, les échanges au sein des unités se concentrent souvent, dès lors, sur les questions financières ou managériales, au détriment du débat d'idées... La plupart des répondant.e.s souhaitent donc un renforcement des dotations des laboratoires, qui permettrait par exemple l'attribution d'un petit budget annuel à chaque membre de l'unité.

L'enquête fait également ressortir la pression croissante pesant sur le temps disponible pour la recherche, pression qui donne lieu à des réponses contrastées. Les collègues exerçant des responsabilités collectives doivent en général renoncer à une large part de leur activité de recherche, ce qui engendre souvent une certaine frustration. A l'inverse, certains

collègues choisissent de se mettre à distance des activités collectives, y compris au sein de leur unité, ce qui peut aboutir à une situation d'isolement, ou d'effectuer des séjours de recherche dans des environnements différents (université ou laboratoire à l'étranger, UMIFRE). S'agissant des enseignant.e.s-chercheur.e.s, les dispositifs permettant une décharge de cours (congé recherche, délégation CNRS) sont peu mentionnés par les répondants, alors que ces dispositifs, qui ont en outre vocation à se développer, permettent d'obtenir du temps de recherche.

Concernant les non-titulaires, leur situation est évidemment affectée par l'ensemble de ces contraintes, auxquelles se rajoute en outre une activité de recherche d'emploi qui implique des candidatures multiples, chronophages et souvent coûteuses financièrement, et qui s'exerce également au détriment du temps de recherche. Plus généralement, on observe à travers les rapports d'autoévaluation des UMR un recours croissant aux contrats de travail à durée déterminée, que ce soit à l'initiative des tutelles ou dans le cadre de projets financés sur ressources propres (contrats de recherche), pour des fonctions de technicien, d'ingénieur ou de chercheur.

Sur le plan des relations au sein des unités et entre unités, plusieurs répondant.e.s ont souligné que dans le contexte de financement par appels à projets précédemment rappelé, les logiques de site peuvent engendrer des tensions pour les UMR multi-sites, dont les équipes se retrouvent parfois engagées dans des initiatives concurrentes. Plus généralement, elles déplorent les restructurations imposées de collectifs de recherche, qui engendrent généralement des tensions frontalières. Mais le « modèle UMR » reste plébiscité et certaines tendances récentes sont également jugées positivement : plus grande internationalisation, développement de l'interdisciplinarité, collaborations inter-unité renforcées dans certains cas... Lors d'une rencontre organisée au printemps 2019 entre une partie de la section et des représentant.e.s des six UMR sous tutelle du ministère de la Culture (recherche architecturale), dans le cadre de la préparation du pré-

sent rapport de conjoncture, les participants ont ainsi souligné qu'un apport précieux des UMR était leur effet positif en termes de socialisation et de coopération interdisciplinaires.

Thématiques et approches

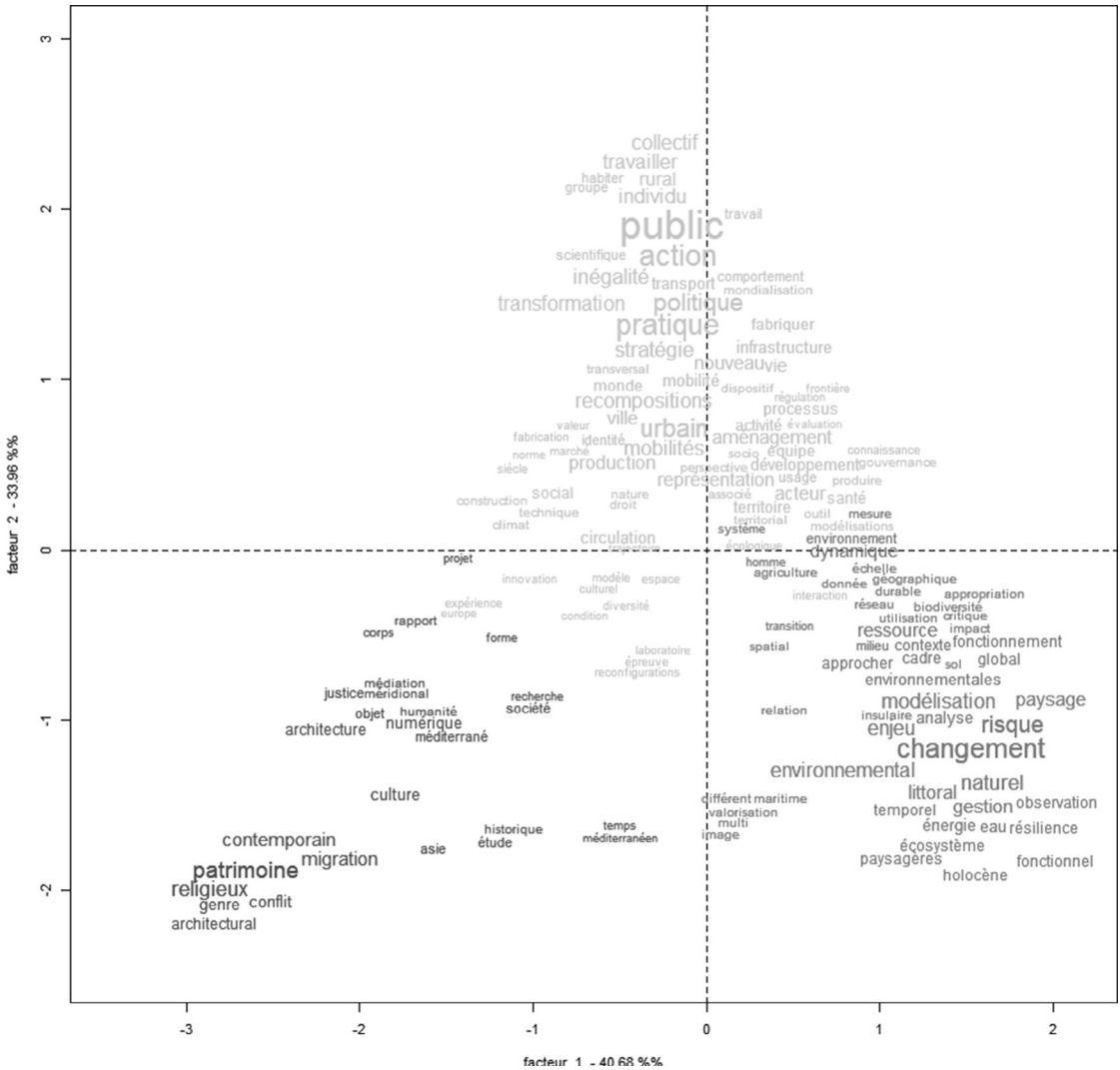
Le « portrait scientifique » qui suit a été élaboré à partir de plusieurs sources et corpus : l'enquête auprès de la communauté de la section, dans laquelle un ensemble de questions portait notamment sur les thématiques menacées ou en déclin, à soutenir dans les années à venir, ou au contraire trop développées ; les axes de recherche affichés par les UMR relevant de la section ; les intitulés des thèses en cours ou soutenues depuis 2014 dans l'ensemble de ces unités ; les tendances observées dans les candidatures aux concours CR. Les évolutions significatives par rapport au portrait analogue dressé dans le rapport de conjoncture 2010 ont fait l'objet d'une attention particulière.

Structurations

Un premier éclairage sur les thématiques structurantes de la section peut être donné par l'analyse des intitulés des grands axes affichés par les unités dans leurs projets quinquennaux. Le corpus considéré ci-dessous inclut une cinquantaine d'UMR de la section, y compris les unités à l'étranger (UMI, UMIFRE), dont l'ensemble des UMR et UMI rattachées à la section à titre principal.

L'analyse a permis de mettre en regard les thématiques affichées dans les rapports des unités avec les réponses à la question suivante de l'enquête : « Dans votre ou vos domaine(s) de recherche, quelles thématiques ou questions scientifiques nouvelles vous semblent devoir être soutenues ? ». Elle est synthétisée ci-dessous.

Graphique 5 : Analyse factorielle du corpus des textes des projets des unités.

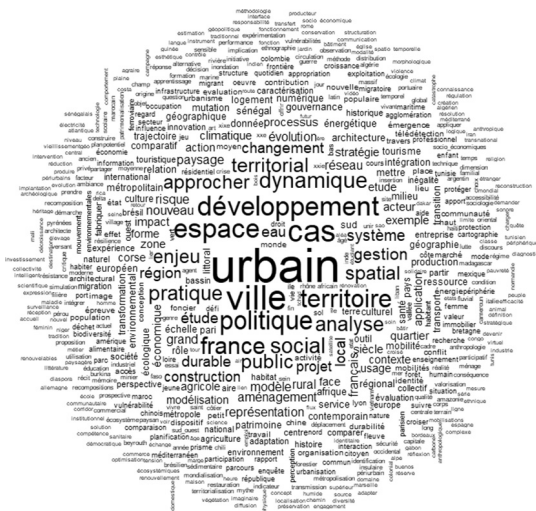


Thématiques des thèses dans les laboratoires de la section

Une analyse complémentaire a été conduite sur les titres des thèses soutenues depuis 2014 ou en cours dans les 26 UMR actuellement rattachées à titre principal à la section 39 en 2019. L'analyse a ainsi porté sur 2 621 titres de thèses ; elle apporte un certain nombre d'éclairages.

tachées à titre principal à la section 39 en 2019. L'analyse a ainsi porté sur 2 621 titres de thèses ; elle apporte un certain nombre d'éclairages.

Graphique 6 : Corpus titres de thèse (a).



Une représentation en nuages de mots, tout d’abord, montre une grande concordance entre les corpus « titres de thèses » et « projets des unités », ce qui n’est pas surprenant. Néanmoins, la hiérarchisation des termes est moins marquée dans le corpus « thèses », ce qui reflète un plus grand foisonnement soit des thématiques de recherche soit des termes utilisés. Les différences les plus notables concernent le terme « développement » (local, territorial, durable, urbain, économique…), plus présent dans le corpus « titres de thèse », et le terme « environnement », plus fréquent dans le corpus « projets d’unités ».

Des analyses factorielles de correspondance (AFC) ont été effectuées en croisant les mots du corpus et les modalités de diverses variables (laboratoire d’appartenance, année de soutenance, région de localisation de l’unité).

L’AFC entre titres des thèses et laboratoires fait apparaître plusieurs groupes de laboratoires (13 au total, soit 50 % des unités) possédant des caractéristiques marquées (en termes de démarches, de secteurs géographiques d’étude ou de thématiques) :

- THEMA, LIVE, ESPACE, GEODE, TETIS, LETG (autour de termes tels que simulation,

Graphique 7 : Corpus projets unité (b).



modélisation, télédétection, environnement, spatial, données, cartographie)

- CREDA, LISA, MIGRINTER, (autour de continents ou de macro-régions : Amérique, Europe, Afrique, et avec une sous-représentation des termes « urbain » et « spatial » par rapport à l’ensemble du corpus

- AAU, AUSSER, LAVUE, MAP (architecture).

L’autre moitié des unités occupe le centre du graphique de manière moins nettement différenciée, ce qui suggère que les spécificités ressortant des titres de thèse ne permettent pas toujours de retrouver les « marques de fabrique » ou l’identité scientifique des unités.

L’AFC entre titres de thèses et année de soutenance ne fait apparaître aucune différenciation significative qui signalerait une évolution des questions, des thématiques ou des approches au cours du temps, peut-être parce que la période d’observation (thèses soutenues entre 2014 et 2020 et thèses en cours) est trop courte.

En revanche, l’AFC entre titres de thèses et localisation régionale fait clairement apparaître trois groupes :

- la modalité Paris - Île-de-France est marquée par un vaste ensemble de mots

Le groupe 1 (rouge) est marqué par les mots migration, Amérique et Afrique (CREDA, MIGRINTER et plus marginalement LISST ; laboratoires avec une localisation francilienne). Le groupe 2 (vert) est caractérisé par les mots développement, territoire, tourisme, acteur (ARTDev, ESO). Le groupe 3 (bleu) est marqué par les mots pratique, ville, représentation, espace, architecture, populaire (laboratoires franciliens, AAU, AUSSER, LAVUE et dans une moindre mesure MAP). Le groupe 4 (violet) est spécifié par les mots changement climatique, application, données, risques (ESPACE, GEODE, LETG, LIVE, TETIS, THÉMA et de manière un peu plus marginale LIED ; laboratoires du Nord-Est et du Nord-Ouest.

Certaines unités ne sont pas spécifiquement rattachées à l'un de ces groupes (PRODIG, GEOGRAPHIE-CITES, PASSAGES, IDEES...). Leurs « identités scientifiques », telles qu'elles ressortent de l'analyse des mots de titres de thèses, apparaissent beaucoup plus multidimensionnelles.

Évolutions

Le retour de l'enquête, les bilans individuels faits par les chercheur.e.s et le contenu thématique des dossiers soumis au concours confirment l'importance croissante de la thématique de **l'environnement** dans la section 39. Cette évolution s'inscrit dans la durée, mais l'environnement tend à être appréhendé de manière différente par rapport aux périodes précédentes (cf. rapports de conjoncture 2010 et 2014). En effet, on constate un plus grand nombre d'approches à caractère holistique ou même systémique, visant à appréhender de nombreuses interactions sociétés-natures, enrichissant des approches plus ciblées en réponse à des problématiques précises, d'écologie politique par exemple, et comportant une dimension critique.

Les recherches sur l'environnement concernent notamment les rapports humains/monde

vivant (en particulier les animaux), les dynamiques de l'environnement naturel et construit (restauration écologique, développement urbain...) et de manière croissante les liens entre santé et environnement. En termes d'approches, un certain nombre de dossiers de candidature au concours mettent en avant des démarches participatives de co-production des données environnementales.

La thématique **territoriale** reste évidemment structurante. Elle recouvre des objets variés avec une prédominance des objets urbains (métropolisation, financiarisation du développement urbain, ville intelligente...), qui n'est cependant pas exclusive (cf. travaux sur les frontières, les migrations et les migrants, les populations déplacées...). On observe même un regain, timide cependant, des études portant sur les espaces ruraux, portées par des problématiques environnementales ou alimentaires. Les recherches sur les dynamiques territoriales suscitent des approches tant quantitatives que qualitatives, y compris à l'échelle des individus et des petits groupes dans une démarche ethno-géographique, avec une perspective souvent critique.

L'importance de la **mondialisation** est analysée en termes d'effets sur le développement local et de circulation de modèles généraux, y compris scientifiques. La question des acteurs, de la gouvernance et des politiques locales est centrale.

Un certain nombre de thématiques mentionnées comme importantes dans l'enquête se révèlent peu présentes dans les candidatures au concours, comme la **mobilité** ou la **recherche architecturale**, déclinée dans l'enquête notamment en lien avec les thématiques relevant des formes urbaines, du paysage et du patrimoine.

En termes d'approches, on note l'essor de **méthodologies « mixtes »**, croisant méthodes qualitatives et quantitatives. Les **données massives** sont mobilisées selon plusieurs angles ou thématiques de recherche (mobilités connectées par exemple), mais sont rarement abordées en tant qu'objet problématique, du point de vue des questions éthiques soulevées

par leur utilisation ou des limites méthodologiques associées à leur exploitation.

Parmi les approches émergentes, on peut noter l'essor des méthodologies qualitatives de **recherche-création**, tant en termes de démarche d'investigation et de production de connaissances qu'en termes de modalités de valorisation des connaissances produites. Ces démarches novatrices soulèvent d'ailleurs des questions spécifiques d'évaluation d'évaluation : quels critères ? quels évaluateur.ice.s ? Enfin, le **corps** s'affirme non seulement comme objet spatial mais également comme outil de connaissance des phénomènes spatiaux.

L'enquête fait enfin ressortir un renforcement de l'ouverture interdisciplinaire de la 39, perceptible à travers notamment les demandes de rattachement d'unités, la présence dans les unités de la 39 de chercheur.e.s relevant d'autres sections (et réciproquement), les candidatures au concours (candidatures issues de disciplines très variées : géographie, anthropologie, architecture, sociologie, économie, urbanisme, sciences politiques, informatique, histoire...).

Ce constat général appelle un commentaire spécifique à la recherche en architecture. Tout en étant historiquement lié à la section 39, le spectre thématique de la recherche en architecture couvre en réalité plusieurs sections de l'INSHS, de l'INEE, de l'INSIS et de l'INS2I. Si des laboratoires évoluant au sein des ENSA arrivent à construire des approches au croisement de champs disciplinaires parfois très éloignés, le recrutement de jeunes chercheur.e.s au profil hybride, susceptible d'intégrer ces laboratoires, reste néanmoins problématique.

Thématiques et approches à soutenir

Plusieurs thématiques et approches à soutenir ressortent de l'enquête, également éclairées par les observations de la section.

La thématique du **développement local** est ainsi mise en avant, notamment, la recherche sur les systèmes d'acteurs, l'économie politique des services, les effets de la mondialisation, les dynamiques de métropolisation ainsi que l'innovation sociale, l'invention spatiale, l'économie du développement ou encore les économies illégales. En somme, la question du local est de retour, dans toute sa complexité et affranchie d'une perspective idiographique. Il est à noter que les approches de **géographie économique** ou d'économie spatiale, qui pourraient éclairer utilement la thématique du développement local, sont peu mentionnées et, de fait, peu portées.

En ce qui concerne **l'environnement**, les réponses à l'enquête invitent à développer les approches critiques de la transition écologique ainsi que les approches sociales, renvoyant aux termes de qualité et de cadre de vie. Les questionnements associés sont divers : territorialisation des problématiques environnementales (y compris production et approvisionnement alimentaires), liens entre agriculture et ressources en eau, nature en ville, relations aux paysages, inégalités de santé en lien avec l'environnement. Les approches morphologiques et physiques sont également mises en avant : performance énergétique du bâti, solutions éco-performantes...

Dans le champ des **approches sociales**, les renforcements souhaités concernent essentiellement les questions de genre et d'intersectionnalité. La faiblesse des approches spatiales en la matière est soulignée. On note aussi une réaffirmation de la thématique des inégalités (énergétiques, de mobilités, de santé...) et un regain d'intérêt pour la question des classes sociales.

En ce qui concerne les **humanités numériques**, l'enquête encourage à l'exploitation des données massives (données multi-capteurs issues des systèmes d'observation de l'environnement, données citoyennes, données issues des réseaux sociaux numériques...) dans différents domaines (mobilité connectée, biodiversité...), ce qui implique de soutenir des développements méthodologiques (fouille de données, traitement automatique du

langage...). Les enjeux éthiques de l'usage des données massives pour la recherche sont également mentionnés.

Sur le plan de la **démarche scientifique**, l'enquête met en avant la nécessité d'approfondir les relations entre les épistémologies propres aux différentes disciplines et la problématique de l'interdisciplinarité, ainsi que le souci d'une approche critique sur les méthodes et le positionnement des chercheur.e.s, dans une perspective de **réflexivité**.

Terrains, échelles

Aires

Les terrains sur lesquels travaillent les chercheur.e.s de la section ayant répondu à l'enquête sont très variés et très souvent, un.e même chercheur.e, mène simultanément des recherches sur des terrains proches et lointains. La France est très présente (plus de 55 % des répondants), suivie de l'Europe (35 %). Viennent ensuite les continents africain et américain (notamment Amérique du Sud) pour une part à peu près équivalente, autour de 15 %, puis l'Asie (12 %).

Les modalités de choix des terrains sont dans la grande majorité des cas motivées par l'intérêt scientifique, par l'opportunité de collaborations, par l'existence de réseaux de recherche, ou encore par l'inscription dans des dispositifs scientifiques, type Observatoires Hommes Milieux ou Zones Ateliers, qui permettent de bénéficier de la capitalisation des données existantes. En revanche, certain.e.s collègues déplorent des contraintes budgétaires de plus en plus fortes pour mener des études internationales à terrains multiples dont ils ou elles soulignent pourtant la très grande richesse scientifique.

Si le rapport précédent mettait en avant l'importance d'une démarche comparative sur

les terrains, le comparatisme ressort moins aujourd'hui. Là encore la contrainte financière est soulignée, ainsi que des procédures administratives souvent trop lourdes. Les déplacements nécessaires aux approches comparatives, parfois à l'étranger, sont très coûteux et rendent de telles recherches très difficiles à mettre en œuvre. Notons que les approches comparatives apparaissent, dans les réponses au questionnaire, tantôt comme « menacées » tantôt comme « trop importantes ».

Dans le cadre de l'internationalisation des recherches en sciences humaines et sociales, qui est une des priorités de l'INSHS, les Unités Mixtes Internationales (UMI) et les Unités mixtes – Instituts français à l'étranger (UMIFRE) sont un élément capital dans la vitalité des recherches françaises. Ces instituts permettent aux chercheur.e.s du CNRS et aux enseignant.e.s-chercheur.e.s des unités de recherche du CNRS d'effectuer des mobilités de longue durée dans des contextes de recherche très divers, au plus près des terrains de recherche. Le réseau des UMIFRE est mobilisé par environ 30 % des chercheur.e.s de la section à un moment ou à un autre de leur carrière. En revanche, 20 % des répondants à l'enquête ne connaissent pas ces dispositifs. On peut noter, assez logiquement, une relation étroite entre l'utilisation ou la non utilisation de ces outils et la localisation des terrains de recherche. Parmi les répondants qui n'ont jamais mobilisé ou ne connaissent pas le réseau des UMIFRE, un grand nombre de collègues mènent leurs recherches en France ou en Europe, alors qu'une majorité des chercheur.e.s connaissant le dispositif travaille dans les pays des Suds.

Espèces d'espaces

Parmi les espaces investigués, l'espace public ressort loin devant les espaces politique et naturel. Certains types d'espaces sont clairement associés à des champs thématiques : c'est le cas par exemple du type « espace naturel » associé à la géographie quantitative, la géogra-

phie physique, la glaciologie, la télédétection, la géographie de l'environnement, des paysages ou encore de la botanique. Les types « espace du corps » et « espace sensible » sont davantage évoqués par des collègues ancrés dans la géographie sociale, la géographie féministe, la géographie du genre et des sexualités, la géographie critique, l'architecture ou l'anthropologie. D'autres au contraire mobilisent un vaste champ de thématiques, comme par exemple le type « espace public » que l'on retrouve autant en géographie et sociologie urbaines et aménagement, qu'en géographie sociale, culturelle et politique. Ou encore le type « espace domestique », qui est mobilisé aussi bien en urbanisme, aménagement, en géographie sociale, en ethno-musicologie ou en modélisation socio-environnementale.

Échelles

À la question portant sur les échelles auxquelles ils et elles travaillent, quasiment tous les enquêtés disent combiner plusieurs échelles dans leurs travaux, position confirmant celle soulignée dans les deux précédents rapports de conjoncture. Dans l'enquête de 2019, 59 % mobilisent ainsi le terme de « multi-échelles », soit seul (pour 17 % des enquêtés), soit combiné à d'autres termes. Les 41 % restants choisissent plutôt d'expliquer une combinaison de deux ou plusieurs termes (local-régional ou micro-local-national par exemple). Le seul mot-clé cité aussi souvent que « multi-échelles » est « local », souvent associé à « micro », montrant l'intérêt pour des recherches à une échelle fine, souvent centrées sur les individus. Très peu nombreux, en revanche, sont ceux et celles qui mentionnent l'échelle « monde » (10 %) ou « continentale » (3 %). Décrivant les thématiques émanant des recrutements de 2010-2014, le rapport de conjoncture précédent soulignait également que le niveau Monde était faiblement étudié et notait la forte diminution des travaux portant sur un niveau méso (Etat, région), en dehors des études comparatives.

Dans l'enquête de 2019, les échelles « méso », « régionale » et « nationale » ne sont pas non plus prédominantes, citées seulement par un quart des enquêtés. La multiplicité des échelles d'observation et d'analyse et le développement des travaux à des échelles très fines sont ainsi deux tendances fortes qui se maintiennent depuis une dizaine d'années. C'est y compris le cas des échelles investiguées par les recherches en architecture, qui restent conceptuellement liées aux lectures de l'espace urbain et du territoire même si quelques travaux des UMR évoluant au sein des ENSA se concentrent sur l'échelle de l'édifice ou encore de l'artefact patrimonial.

Pluralité des terrains d'enquête au-delà des espaces géographiques

Espaces du corps (et pratiques corporelles de l'espace). Les recherches relatives aux rapports des corps et des espaces suscitent un intérêt grandissant de la part des chercheurs ces dernières années, avec deux orientations principales : le corps en tant qu'entité inscrite dans l'espace et qui rentre en interaction avec d'autres corps ; le corps en tant qu'outil d'exploration de l'espace. (i) La première orientation concerne les manières dont l'organisation et l'aménagement des espaces affectent l'expérience individuelle et les rapports à l'espace dans leurs modalités sociales, émotionnelles, cognitives. En outre, l'étude de l'influence de l'espace géographique, à travers ses multiples composantes (environnementale, socio-économique, culturelle), sur le bien-être et la santé des populations est favorisée par le rôle croissant de la problématique environnementale dans le débat public. (ii) Le corps est également un outil d'exploration et de connaissance de l'espace, souvent mobilisé dans cette perspective dans des démarches artistiques (recherche-création) ou esthétiques. Moyen d'expression, de communication avec le monde ou de transmission du savoir, il peut également être appréhendé comme un lieu

de négociation de la relation à l'environnement humain, social et matériel. Au plan épistémologique, ces démarches donnent lieu à des interrogations sur la place du sensible dans la production de connaissances scientifiques.

Espaces organisationnels. Les organisations sociales produisent et sont le produit de spatialités. La proximité joue un rôle renouvelé dans les organisations sociales à l'échelle des territoires par exemple en réponse à la prise en considération des problématiques environnementales dans les politiques locales, régionales et nationales (autonomie locale, circuits courts, etc.).

Espaces numériques. Le développement rapide, massif et multiforme des technologies numériques affecte de plusieurs manières les pratiques spatiales et leur étude. Trois registres peuvent être évoqués : les espaces organisationnels numérisés ; les espaces ordinaires augmentés ; les espaces virtuels. (i) Les effets du développement rapide des infrastructures et des données numériques dans les activités productives s'observent avec une intensité élevée dans l'activité de recherche sur les pratiques spatiales, et plus largement sur l'ensemble des dynamiques territoriales, dont les modalités sont progressivement transformées en profondeur, appelant à des réflexions de nature épistémologique (cf. section « approches, méthodes, données »). (ii) L'équipement croissant des individus en technologies et services numériques nomades affecte significativement leurs pratiques spatiales, appelant à un *aggiornamento* des connaissances sur ces pratiques et ouvrant ainsi de nouveaux champs de recherche. (iii) L'étude des pratiques spatiales dans des environnements virtuels et de leurs liens d'influence mutuelle avec la pratique des espaces réels contribue au renouvellement des questionnements (sur les ressorts des interactions à distance à partir de l'étude des jeux multi-joueurs, par exemple), des objets (mobilité virtuelle / mobilité réelle) et des méthodes (jeux sérieux) des recherches spatialistes.

Approches, méthodes, données

Des approches de plus en plus diversifiées et combinées

L'analyse de l'enquête et des candidatures au concours CR permettent de dresser un triple constat sur les approches, méthodes et données mobilisées dans les activités de recherche des membres de la section 39. Si le caractère interdisciplinaire et pluri-thématique a toujours favorisé une grande diversité d'approches, on relève une tendance, tant pour les approches qualitatives que quantitatives, à une diversification encore plus marquée des méthodes de recherche. Cette forte diversification s'accompagne d'une montée en puissance des méthodes « mixtes » : nombre de candidats aux concours combine désormais un panel d'approches complémentaires. Enfin, une plus grande réflexivité dans la démarche scientifique est perceptible.

Au-delà de ces trois tendances générales, plusieurs évolutions saillantes peuvent être relevées.

Les données massives : de l'outil à l'objet de recherche

L'intégration des données massives (*big data*) dans le périmètre des recherches de la section 39 fait apparaître trois registres d'évolution : sur l'utilisation de nouvelles sources de données, sur la refonte des méthodes que nécessite le traitement de ces nouvelles données, sur le renouvellement des questions de recherche qu'elles peuvent entraîner.

Tout d'abord, l'accessibilité améliorée à des corpus de données inédits et volumineux renouvelle en profondeur nombre de travaux de recherche. Ainsi, par exemple, les études

en télédétection suivent l'évolution de l'offre en imagerie satellite. Dans le domaine de l'analyse spatiale, de nombreuses recherches se confrontent désormais à des données inédites issues, par exemple, des traces numériques des citoyens-capteurs ou d'objets connectés. La mobilisation de ces nouveaux corpus soulève alors des enjeux éthiques, notamment sur la protection des données personnelles et pour que les pratiques de recherche se mettent en conformité avec les évolutions réglementaires (RGPD). Elles doivent aussi répondre à une forte demande sociale de retour des données produites par les chercheur.e.s vers la société civile. De plus, la numérisation de fonds documentaires structurés et contextualisés suivant des standards internationaux fournit un matériel de recherche lui aussi inédit.

Ce renouvellement des corpus peut nécessiter une reconfiguration des méthodes de recherche : de la collecte de données (avec la généralisation de l'usage du *web scrapping*, par exemple) à leur exploration (par des techniques de fouilles de données, par exemple) ou à leur géovisualisation (dynamique et/ou interactive).

Enfin, face à un renforcement des approches guidées par les données (*data driven research*), les chercheur.e.s de la 39 interrogent une forme de néo-positivisme numérique en renouvelant leurs approches critiques. Si la critique de la statistique, de la cartographie ou plus largement de la technique existe depuis longtemps, des recherches émergentes jouent aujourd'hui le jeu de l'immersion dans les données, le code informatique et les situations de terrain afin d'ouvrir les boîtes noires algorithmiques et d'en révéler les enjeux socio-spatiaux. Ce faisant, au-delà de la dimension méthodologique, le *big data* fait apparaître de nouveaux objets de recherche.

L'exploration de nouveaux dispositifs d'enquête in situ

De nouveaux dispositifs d'enquête qualitatifs sont expérimentés, s'appuyant sur l'exploration

de méthodologies d'investigation in situ originales, l'ouverture à de nouvelles formes et formats de restitution des résultats, la place croissante accordée aux récits, l'usage raisonné d'outils de captation audio-visuelle, et même l'introduction de la fiction et d'autres démarches de création. Les recherches interrogent ainsi la mise en récit des expériences plurielles de recherche à propos du territoire compris comme milieu de vie, impliquant les savoirs et les imaginaires, le corps sentant et les autres vivants. Le terrain est essentiel à cette orientation épistémologique, dans la mesure où la recherche est ainsi située temporellement et spatialement, dans le jeu contraint des situations d'enquête. Ces approches sont profondément marquées par l'expérience sensible des terrains.

Sciences ouvertes : du libre-accès aux sciences citoyennes

Face à un concept polyvalent susceptible d'être défini de façons multiples selon les contextes et les acteurs impliqués, les pratiques de recherche, les modalités de production et de diffusion des résultats mais aussi la relation au terrain des chercheur.e.s de la section 39 révèlent une acception large et ambitieuse de la science ouverte. Ainsi, sans se limiter au mouvement vers le libre accès aux ressources scientifiques (publications, logiciels, données, codes), mais tout en y contribuant largement, l'ouverture de la recherche passe également, pour nombre de programmes de recherche de la section, par un changement épistémologique profond en s'ouvrant à l'inclusion en leur sein des savoirs locaux, des préoccupations des communautés locales et d'une pluralité de langues, de manières de produire de la connaissance et de lieux de diffusion. Avec cette acception élargie de l'open science, il s'agit donc à la fois de *partager les connaissances* mais aussi de *faire science ensemble*.

Partager les connaissances : l'ouverture des données, méthodes, publications, évaluations

Avec le développement des infrastructures numériques, des plateformes web pour diffuser l'Information Scientifique et Technique (IST) permettent potentiellement d'ouvrir les données, les méthodes, les publications et les évaluations.

Une bonne majorité des répondants à l'enquête considère ainsi que leur pratique de publication et de partage de leurs travaux a évolué avec le développement de la science ouverte et constate la démultiplication des supports possibles (blog personnel, journaux du bouquet OpenEdition, Academia, ResearchGate...) et en particulier l'importance de la plateforme HAL-SHS. Tout ceci dans un objectif de circulation et diffusion plus rapide à l'international.

De nombreux collègues utilisent ou sont impliqués dans le déploiement de catalogues ou portails de données à l'échelle de projets de recherche, d'UMR ou de consortiums de recherche (IMAGEO, par exemple). Ces infrastructures permettent de documenter et diffuser des données aux formats multiples (cartes anciennes, photographies, données géographiques, images satellites, données sonores, etc.). Ces pratiques restent cependant encore marginales même si, impulsée par le cadre réglementaire, cette tendance semble gagner du terrain.

Au-delà des données, pour favoriser la traçabilité et la reproductibilité des recherches, le développement de modèles identifiables, accessibles et largement réutilisables est aujourd'hui un véritable enjeu. L'utilisation de plateformes de logiciels libres, de codes informatiques structurés et documentés ou encore de démonstrateurs indépendants constituent alors des éléments de plus en plus fréquents (GeOpenMod/Cybergéo, par exemple). Les enjeux de gouvernance qui y sont associés apparaissent cependant, encore aujourd'hui, comme des impensés.

Conformément aux recommandations de l'INSHS, le portefeuille de revues scientifiques

associées à la section 39 s'inscrit désormais majoritairement dans une logique de libre accès favorisant la diffusion des articles de la communauté. Le Comité national relève cependant des pratiques éditoriales très différentes en fonction des disciplines qui tendraient aussi à promouvoir, en parallèle du libre accès, la bibliodiversité.

Enfin, la publication des articles en accès ouvert natif offre des opportunités inédites pour redéfinir les méthodes d'évaluation des publications : ouverture des procédures d'évaluation par les pairs, ouverture des rapports d'évaluation voire ouverture à l'évaluation par tout lecteur. La section 39 apparaît plus en retrait à cet égard, les revues expérimentant ce type de dispositif (JIMIS, Espaces-Temps...) restant en nombre relativement limité.

Faire science ensemble : les sciences participatives et citoyennes

Bien que l'idée ne soit pas récente, la généralisation des programmes de sciences participatives ou citoyennes et leur institutionnalisation progressive sont perceptibles à travers plusieurs signaux faibles convergents au sein de la section 39. La constitution de réseaux nationaux et européens de recherche sur le sujet, l'accessibilité à des bases de données en provenance de ces systèmes, la multiplication des appels à projets incitant au développement de ces dispositifs ou encore la parution de numéros de revue dédiés témoignent de la place grandissante de ces approches. L'usage d'Internet a également accéléré les possibilités d'outillage de ce type de dispositif dont le niveau de collaboration entre les acteurs engagés est très variable et dont les conditions d'exploitation des données soulèvent des enjeux méthodologiques majeurs, en particulier en matière de distribution spatiale. Or, c'est justement en interrogeant ces pratiques, dans leur dimension socio-spatiale, que certain.e.s candidat.e.s ou chercheur.e.s de la section 39 se positionnent comme observateur.rice.s critiques : les sciences citoyennes et participatives deviennent alors un objet de recherche.

Évaluation des « produits de la recherche »

Les résultats de l'enquête menée, les témoignages exprimés par les chercheur.e.s CNRS dans leurs rapports d'activité et les discussions menées avec la communauté de la section 39 lors des AG organisées depuis trois ans reflètent une satisfaction d'ensemble sur la manière dont les productions scientifiques sont recensées (RIBAC) et appréhendées par les instances d'évaluation. Quatre points d'inquiétude sont cependant réaffirmés :

- Obsession et pressions de la bibliométrie : nombre de répondant.e.s continuent à alerter sur un risque de normalisation des outils d'évaluation, prenant modèle sur d'autres domaines scientifiques et privilégiant les articles publiés dans des revues scientifiques « internationales » (*i.e.* anglophones) au détriment de toutes autres productions. Une telle évolution serait préjudiciable aux productions en SHS. Plusieurs répondant.e.s alertent sur les risques associés à la domination d'un modèle « anglo-saxon » et en particulier à la norme qu'il véhicule quant au « dosage » souhaitable entre propositions théoriques et investigations empiriques, qui influe à son tour sur la nature des connaissances produites ;

- Faible reconnaissance de ce qui n'est pas un article dans une revue scientifique avec évaluation par les pairs (ACL) : nombre de répondant.e.s considèrent que les ouvrages ainsi que les productions relevant de la « vulgarisation », de la « recherche-action » ou de l'expertise, et plus largement de la diffusion de connaissances scientifiques vers la société civile, ne sont pas suffisamment valorisés ou reconnus ;

- Prise en compte insuffisante des productions scientifiques collectives, du travail de création d'outils collaboratifs, de la production de (bases de) données... ;

- Valorisation insuffisante des travaux et des publications interdisciplinaires dans l'éva-

luation des chercheur.e.s et des enseignant.e.s-chercheur.e.s.

En outre, l'évaluation de la production scientifique s'inscrit dans un contexte d'évolution profonde des métiers de la recherche : valorisation des chercheur.e.s pris individuellement au détriment des collectifs par le biais des programmes de financement de type ERC ; transfert de certaines charges d'administration et de gestion aux chercheur.e.s et notamment aux enseignant.e.s-chercheur.e.s ; alourdissement des procédures pour l'organisation des missions de recherche ; démultiplication des tâches de diverses natures (expertises, évaluations, gestion de l'enseignement pour les enseignant.e.s-chercheur.e.s) qui tendent à réduire le temps consacré à la recherche elle-même.

La section continuera à appréhender l'activité des chercheur.e.s dans toutes ses dimensions et, dans l'évaluation de la production scientifique, à privilégier la qualité de la production scientifique, la diversité des formes de restitution (nature, formats, supports, langues...) et les apports du chercheur évalué dans le domaine scientifique⁽⁵⁾. Elle est de ce point de vue en accord avec les principes d'évaluation affichés par le CNRS dans sa *Feuille de route pour la science ouverte* publiée en novembre 2019⁽⁶⁾ :

« 1. Ce sont les résultats eux-mêmes qui doivent être évalués, et non pas le fait qu'ils aient pu être publiés dans une revue prestigieuse ou autre média réputé.

2. Pour chacune des productions citées dans les dossiers d'évaluation les chercheurs et les chercheuses doivent en expliquer la portée, l'impact, et la contribution personnelle qu'ils y ont apportée.

3. Tous les types de production doivent pouvoir être des éléments de l'évaluation.

4. Toutes les productions citées dans les dossiers d'évaluation doivent être accessibles dans HAL ou éventuellement dans une autre archive ouverte. »

Elle alerte enfin la communauté sur le développement inquiétant de l'édition prédatrice (cf. encadré 4).

Encadré 4 : Revues prédatrices, éditeurs prédateurs.

Les éditeurs prédateurs (revues et ouvrages) sont des éditeurs dont les objectifs commerciaux priment sur toute considération scientifique. L'édition prédatrice se développe rapidement et concerne aujourd'hui des centaines de milliers de publications (articles majoritairement, mais aussi ouvrages). Les publications issues des revues et des éditeurs prédateurs ne peuvent pas être prises en considération pour l'évaluation de la production scientifique des chercheur.e.s. Le recours fréquent ou systématique à de tels éditeurs sera même apprécié négativement. Diverses ressources en ligne donnent des éléments d'information sur les éditeurs prédateurs, par exemple :
<https://scholarlyoa.com/publishers/>
<https://scholarlyoa.com/list-of-standalone-journals/>

Conclusion

En guise d'épilogue, la section souhaite vivement remercier « sa » communauté scienti-

fique pour sa participation aux échanges lors des assemblées générales et pour ses réponses à l'enquête, qui ont nourri le présent rapport de conjoncture.

GLOSSAIRE

ACL : À Comité de Lecture	FRE : Formation de Recherche en Évolution
AFC : Analyse Factorielle des Correspondances	FSEP : Fonctions Susceptibles d'Être Pourvues
ANR : Agence Nationale de la Recherche	HAL : Hyper Articles en Ligne
BAP : Branches d'Activités Professionnelles	HCERES : Haut Conseil de l'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur
CICRP : Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine	IDEX : Initiative D'EXcellence
CR : Chargé.e de Recherche	IDF : Île-de-France
CRCN : Chargé.e de Recherche de Classe Normale	INEE : Institut Écologie et Environnement
DIPEE : Dispositif de partenariat en écologie et environnement	INRAP : Institut national de recherches archéologiques préventives
DR : Directeur.trice de Recherche	INS2I : Institut des Sciences de l'Information
DRH : Direction des Ressources Humaines	INSHS : Institut des Sciences Humaines et Sociales
ENSA : École Nationale Supérieure d'Architecture	INSIS : Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
ERC : European Research Council	ISITE : Initiative Science-Innovation-Territoires-Économie
FR : Fédération de Recherche	

IT : Ingénieur.e et Technicien.ne

ITA : Ingénieur.e, Technicien.ne et Administratif.ive

MSH : Maison des Sciences de l'Homme

NOEMI : Nouveaux Emplois Offerts à la Mobilité Interne

RGPD : Règlement général sur la protection des données

RIBAC : Recueil d'Informations pour un observatoire des Activités de recherche

SHS : Sciences Humaines et Sociales

UMI : Unité Mixte Internationale

UMIFRE : Unité Mixte des Instituts Français de Recherche à l'Étranger

UMR : Unité Mixte de Recherche

UMS : Unité Mixte de Service

USR : Unité de Service et de Recherche

Notes

(1) Dans la suite de ce rapport, la graphie épiciène « chercheur.e.s » sera souvent employée par commodité.

(2) Au 15 septembre 2019. Source : Base Zento

(3) Au sens où elles ont pour tutelles des établissements locaux n'appartenant pas à une même communauté d'établissements.

(4) Deux unités n'ont pu être prise en compte dans cette observation faute de données disponibles.

(5) Cf. critères de la section : http://conrs39.free.fr/2020/documents/Criteres_section39_mandat_2016-2020.pdf

(6) https://www.cnrs.fr/sites/default/files/press_info/2019-11/Plaquette_ScienceOuvverte.pdf

SECTION 40

POLITIQUE, POUVOIR, ORGANISATION

Composition de la section

Didier DEMAZIÈRE (président de section)*, Ioana POPA (secrétaire scientifique)*, Amin ALLAL, Sophie BÉROUD**, Claire DUPUY***, Florence FAUCHER***, Martial FOUCAULT***, Laurent FOURCHARD***, Isabelle GUINAUDEAU* **, Jean-Philippe HEURTIN* ****, Claire LE POULENNEC, Aleksandra MIKANOVIC, Erik NEVEU***, Maxime QUIJOUX, Andy SMITH*, Marc SMYRL, Yves SUREL, Virginie TOURNAY**, Pascale TROMPETTE* ***, Christophe TRAJNI***, Antoine VAUCHEZ, Richard VINCENDEAU.

Résumé

Ce rapport de conjoncture souligne les dynamiques scientifiques qui se développent dans le large ensemble de domaines de recherche qui s'articulent dans le périmètre de la section. À partir de ces analyses, le rapport explicite une série d'enjeux transversaux contemporains dont il montre les déclinaisons dans le champ de la section : internationalisation de la recherche et ses traductions multiples, évolutions de la pluralité des approches méthodologiques et épistémologiques, articulations des différentes composantes des activités des chercheurs. Enfin, ce rapport aborde la

question des moyens alloués à la recherche (recrutements, carrières, laboratoires, revues). Il établit leur caractère insuffisant et souligne plusieurs de leurs effets problématiques : hyper-sélection, risque de concentration des ressources, accroissement des inégalités.

Au-delà, ce rapport a vocation à interpeller la communauté scientifique et les dirigeants des organismes de recherche et d'enseignement supérieur sur les évolutions inquiétantes de la recherche publique, qui se manifestent par une contraction de l'emploi scientifique et technique, une dégradation alarmante de la situation des docteurs, une insuffisance des financements de soutien à la recherche, une exacerbation de

* Membre du bureau.

** Membre de la section depuis 2019.

*** Membre de la section de 2016 à 2019.

**** Membre de la section de 2016 à 2018.

la compétition, une défaillance du soutien public à la recherche fondamentale. À travers ce rapport la section 40 manifeste aussi son adhésion et son soutien au document de diagnostic et propositions établi en juillet 2019 par le Comité national sur la recherche publique en France (voir : https://www.cnrs.fr/comitenatio/Actualites/Propositions_Comite-national_Juillet-2019.pdf), dans la perspective de contribuer au débat préparatoire à l'élaboration du projet de loi de programmation pluriannuelle de la recherche.

Introduction

La section 40 « Politique, pouvoir, organisation » a été créée en 1991 dans le cadre d'un redécoupage des sections du Comité national. Elle réunit la science politique dans son ensemble, ainsi que plusieurs domaines de la sociologie relatifs principalement au travail, aux organisations, aux activités économiques. Les autres domaines de la sociologie sont rattachés à la section 36 (« Sociologie et sciences du droit »). Les différences disciplinaires au sein du périmètre de la section 40 apparaissent peu marquées au plan intellectuel, et s'estompent ou disparaissent dans de nombreux domaines et thématiques de recherche. C'est au plan institutionnel que la science politique et la sociologie sont organisées de manière plus différenciée, que l'on considère les instances universitaires (sections du CNU et souvent facultés ou départements), les associations professionnelles et sociétés savantes, ou encore, les revues.

Aussi la présente contribution débute par une analyse du domaine de recherche de la section 40 (son périmètre, sa diversité interne, ses dynamiques contrastées), puis elle traite d'enjeux transversaux pour la recherche en les articulant aux pratiques et aux politiques scientifiques (internationalisation de la recherche, pluralisme méthodologique et épistémologique, professionnalisation des chercheurs), et enfin elle aborde la question des moyens

alloués à la recherche (recrutements, carrières, laboratoires, etc.) ainsi que leurs conséquences pour le développement du domaine (sélection, diversité, inégalités).

I. Le domaine scientifique de la section 40

A. Des thématiques et domaines multiples

Le tracé du périmètre de la section 40 a conduit au regroupement de la science politique et d'une partie de la sociologie. Près de trois décennies plus tard, la distinction entre ces deux références disciplinaires n'a pas disparu, car celles-ci sont des repères pertinents dans de multiples espaces professionnels, qu'il s'agisse des formations doctorales, des supports de publication, des sociétés savantes, des congrès nationaux et internationaux etc. Pourtant ces deux références disciplinaires institutionnellement établies ne fonctionnent pas comme des référentiels intellectuellement clivants, notamment parce qu'elles s'entrecroisent autour d'objets multiples et dans maints domaines de spécialité.

La section 40 couvre un large ensemble de domaines de recherche, qui peuvent être définis à des échelles différentes. À une maille plus fine que les mots-clés attachés à la section, et à une échelle qui a l'avantage de renvoyer à des communautés scientifiques actives, et ouvertes vers d'autres disciplines et vers l'international, on peut distinguer des grands domaines, comme les comportements politiques, les mouvements sociaux, les études électorales, les partis politiques, les études européennes, les régimes politiques, la politique comparée, les organisations, les activités économiques, l'action publique, les discriminations, le travail, la formation historique et les transformations de l'État, les marchés du travail et les professions, les relations

internationales, la théorie et la philosophie politiques, les aires culturelles, les relations professionnelles, les controverses scientifiques, etc. Chacun de ces domaines pourrait être décrit en distinguant des objets plus précis, des spécialités plus fines, des questions plus pointues, des approches plus spécifiques.

Ayant acquis une visibilité, ces domaines sont institutionnalisés, à travers des revues spécialisées, des manifestations scientifiques plus ou moins récurrentes, des programmes de recherche plus ou moins pérennes. Et ils constituent peu ou prou des référentiels scientifiques, caractérisés par des débats spécifiques, des travaux emblématiques, des enjeux de développement. En ce sens ils ne sont pas des tiroirs ou classeurs dans lesquels les recherches pourraient être distribuées mais ils représentent des espaces professionnels d'affiliation, de circulation, de discussion, de coopération.

Ils ont aussi leurs spécificités. Et tous se caractérisent par une diversité interne, qui contribue à leur dynamique. Ils sont aussi très hétérogènes, car ils s'inscrivent dans des traditions et profondeurs historiques variées, agrègent des effectifs de chercheurs disparates, sont inégalement présents dans les grandes institutions d'enseignement et de recherche, sont portées par des communautés contrastées par leur cohésion, leur ancrage international, leur démographie, leur renouvellement, etc. Et, parallèlement à des spécialisations croissantes qui s'emboîtent à des échelles différentes, des espaces transversaux contribuent à structurer les activités de recherche : les laboratoires qui développent des programmes de recherche diversifiés, les revues généralistes qui sont des espaces incontournables de débats scientifiques, les sociétés savantes qui fédèrent chaque discipline(s), etc.

B. Des dynamiques scientifiques plurielles

Considérées à l'échelle globale du périmètre de la section, les dynamiques scientifiques apparaissent solides : les évaluations des cher-

cheurs montrent de manière générale un niveau d'investissement élevé dans toutes les dimensions du métier (activités de recherche, publications, animation scientifique, enseignement, responsabilités collectives, expertise, etc.) ; les concours de recrutement sont fortement attractifs et très sélectifs (voir la partie 3 de ce rapport) ; les laboratoires rattachés à la section ont des programmes de recherche stimulants et originaux même s'ils sont confrontés à des inégalités de moyens (voir partie 3 de ce rapport) ; les revues évaluées par la section couvrent de multiples domaines de recherche ; les demandes de délégation au CNRS déposées par les enseignants-chercheurs sont nombreuses et pour la plupart solidement étayées, etc. L'appréciation des dynamiques scientifiques à l'échelle plus fine des thématiques ou sous-domaines est en revanche plus délicate à établir, non en raison des caractéristiques des activités qui s'y développent mais pour des questions de méthode.

Pour établir un diagnostic, la section ne dispose que de trois années d'expérience, alors que l'évaluation des chercheurs et de leurs laboratoires est étalée sur les cinq années du mandat. Plus globalement, que la temporalité soit de trois ou cinq années elle est bien courte par rapport aux échelles des dynamiques scientifiques. La sociologie des sciences, et des sciences sociales plus spécifiquement, enseigne que l'émergence de nouvelles questions et l'affirmation de conceptualisations renouvelées se déploient dans des périodes plus longues. De même, l'épuisement de paradigmes, l'affaiblissement de l'intérêt pour tel ou tel domaine, la routinisation de manières de penser sont des mouvements qui s'inscrivent dans des profondeurs temporelles plus amples. À l'inverse, de nouveaux enjeux, aussi bien sociaux que scientifiques, peuvent sourdre dans des mouvements plus brusques et inattendus, déstabilisant alors des diagnostics établis préalablement.

De plus, de par ses missions la section a acquis une connaissance précise des recherches conduites par les chercheurs du CNRS quand celles des enseignants-chercheurs ne sont appréhendées qu'à travers les rapports quin-

quennaux des UMR et les demandes de délégation au CNRS. La recherche réalisée en dehors des UMR échappe grandement, sinon totalement, à son observation, alors même que certains domaines peuvent y avoir de solides ancrages. Enfin, la composition de la section ne permet pas de couvrir l'ensemble des spécialités de recherche inscrites dans le périmètre de la section, sinon de façon inévitablement déséquilibrée et inégale. Cela complique sérieusement la production d'un diagnostic précis et solide qui identifierait les grandes avancées de connaissance et les dynamiques à soutenir, et plus encore les questions délaissées et les domaines à renforcer prioritairement. Pour procéder à un diagnostic des dynamiques de recherche dans le cadre du rapport de conjoncture, on pourrait concevoir à l'avenir la constitution d'un groupe de travail comprenant les membres de la section et élargi à des représentants des principales associations académiques et à quelques experts choisis afin d'enrichir encore ce groupe.

La réflexion sur la méthode permettant d'identifier des dynamiques scientifiques, potentiellement contrastées, est d'autant plus importante qu'une multitude d'indicateurs peuvent être retenus, qui ne convergent pas nécessairement. Pour tout domaine de recherche, à supposer que son périmètre puisse être délimité suffisamment clairement, on peut comptabiliser le nombre de thèses soutenues, identifier les publications afférentes (revues spécialisées, numéros thématiques, articles, livres, etc.), retenir les panels qui s'y rapportent dans les congrès nationaux et internationaux. Beaucoup d'autres indices peuvent être privilégiés pour caractériser une dynamique scientifique : les programmes de financement fléchés (de la part du CNRS, de l'ANR, ou d'autres organismes plus spécialisés), les politiques de coloriage des postes ouverts au recrutement (dans les organismes de recherche comme dans l'enseignement supérieur), la création de revues spécialisées (facilitée aujourd'hui par la diffusion électronique), etc.

Dans un tel contexte, une attention particulière doit être accordée aux politiques de soutien à certains domaines de recherche. Sur ce point la section formule deux éléments de bilan, relatifs à

la politique de coloriage de postes ouverts au concours de chercheurs au CNRS, et à la politique de soutien aux activités de recherche.

– Concernant les coloriages, sur les 14 postes ouverts aux concours chargés de recherche entre 2017 et 2019, 6 ont été coloriés. Ces coloriages, définis en concertation entre la direction de l'InSHS et la section, ont été les suivants : Faits ou mouvements religieux, Enjeux environnementaux, Européanisations ou organisations internationales, Mondes industriels, Démocraties et autoritarismes, Précarisations et citoyenneté. Ces coloriages sont des marqueurs de priorités scientifiques. Celles-ci sont définies au croisement de deux types de paramètres : d'un côté il s'agit de prendre en compte des enjeux sociaux du moment, soutenir des thématiques considérées comme délaissées ou insuffisamment investies ; de l'autre il s'agit de rencontrer des réservoirs significatifs de candidatures. L'expérience montre que ce dernier paramètre est le plus incertain, parce que les questions peu investies correspondent parfois, mais pas toujours, à des potentiels de recherche faibles. Ce type de tension peut être surmonté par une prise en compte souple des coloriages lors des recrutements. Une réponse complémentaire pourrait être d'inscrire les coloriages dans un moyen terme plutôt que d'en publier de nouveaux chaque année. En revanche, compte tenu des incertitudes sur les réservoirs de candidatures, la section recommande de ne pas recourir au fléchage de poste, impliquant l'ouverture d'un concours spécifique.

– Concernant la définition de priorités scientifiques, la section souligne l'importance de cibler des enjeux transverses aux disciplines et domaines de recherche afin d'impulser et accompagner l'enrichissement des approches, questionnements et pratiques de recherche. Un exemple emblématique est celui des potentialités ouvertes par les développements du numérique : c'est à l'échelle des méthodes d'enquête, de collecte et de traitement des matériaux que les enjeux de développement de la recherche sont les plus lourds. Quant à leurs conséquences sur les phénomènes sociaux et politiques, elles relèvent de processus dont les chercheurs, enracinés dans leurs domaines de

spécialité font ordinairement leur objet. Un autre exemple est celui des études aréales, où le rôle du CNRS s'affirme avec pertinence car ce domaine de recherche exige non seulement des spécialisations approfondies – et multiples – des chercheurs mais aussi des coopérations durables entre disciplines. Sur ce point, la section souligne l'importance d'ancrages disciplinaires forts, seuls gages de dialogues féconds entre spécialistes d'un même domaine. À l'échelle collective, l'organisation de ces coopérations doit prendre des formes variées, combinant la spécialisation de certaines unités de recherche et la constitution de réseaux stables et plus vastes.

Dans le registre du soutien de certaines thématiques à travers des financements dédiés, la section s'interroge sur les effets en creux de cette politique. La définition de priorités scientifiques, plus ou moins liées à l'actualité (voir les questions des attentats, des radicalités religieuses par exemple) permet de développer des programmes importants, socialement et scientifiquement. En revanche, elle ne doit pas occulter que d'autres domaines sont confrontés à des difficultés de financement quand ils n'apparaissent pas dans les appels d'offres (l'ANR par exemple a un programme « Travail et innovation » mais les objets proprement politiques ont beaucoup perdu en visibilité ces dernières années). Pour répondre à ces difficultés, en partie inévitables, la section considère qu'il est souhaitable d'ouvrir des lignes non fléchées thématiquement de type crédit d'amorçage (*seed money*) pour soutenir l'investigation des questions qui sont identifiées comme prioritaires par les chercheurs eux-mêmes. Un tel mécanisme, peu coûteux, peut avoir des effets de levier sur les dynamiques scientifiques de larges domaines de recherche, en débouchant ensuite sur la production de projets d'envergure ou la constitution d'équipes internationales.

C. Articulations disciplinaires et périmètre de la section

Si le périmètre de la section est pluridisciplinaire, les frontières entre disciplines, et entre

grands domaines, sont fréquemment franchies dans le cours du travail de recherche. Sur une grande variété d'objets empiriques, des proximités s'affirment et des échanges se multiplient : les problématiques de représentation, de gouvernance, de régulations publiques et privées, de mouvements sociaux, d'histoire des idées sociales et politiques, de relations internationales, de circulations transnationales (des normes, des pratiques, des idées etc.), d'économie politique, etc., en offrent quelques exemples éloquents.

Dans les dynamiques de reformulations des questions de recherche, les articulations et hybridations se renforcent. Le domaine de l'action publique en constitue une illustration, parmi d'autres, puisque ce domaine bien établi et très dynamique de la science politique a aussi été investi par sociologues et politistes autour d'intérêts pour les activités de travail produites au sein des administrations, pour la place des professions au sein de l'État, pour les relations entre autorités publiques et acteurs économiques tels que les firmes, pour les recompositions des régulations publiques et privées, etc. Bien d'autres domaines peuvent être cités auxquels science politique et sociologie contribuent de concert et, ce faisant, estompent la distinction disciplinaire : l'étude des mobilisations et des formes d'action collective, des personnels politiques et de leurs carrières, des partis politiques, des professionnels des institutions internationales, des groupes discriminés ou dominés, de l'environnement et de sa régulation, des controverses scientifiques ou politiques, des conflits armés et de leurs conséquences, des relations de pouvoir entre acteurs internationaux, des relations professionnelles et des négociations collectives, des activités scientifiques et techniques, etc.

On trouve bien d'autres traces de ces dialogues dans les présences croisées de sociologues et politistes – tels qu'on peut les définir à partir de la discipline de leur thèse ou habilitation à diriger des recherches – dans les congrès des associations disciplinaires nationales ou internationales, dans les compositions des comités de rédaction des revues françaises généralistes ou thématiques, dans maintes

équipes de recherche constituées autour de projets bénéficiant de financements, dans nombre de jurys de thèses ou de HDR, et bien entendu dans les références mobilisées, les travaux discutés, les circulations de concepts, etc.

De ces dynamiques plurielles, à l'échelle de domaines ou sous-domaines, des disciplines et de leurs relations, résulte un foisonnement scientifique que la section reconnaît et valorise. Elle en est d'ailleurs aussi le reflet, puisque ses membres ont des ancrages dans des domaines spécifiques, dans des traditions disciplinaires différentes, et dans des paradigmes variés. La pluralité des thématiques, approches et méthodes, des manières d'investir le métier de chercheur, des productions issues des recherches et des publications, caractérise les travaux inscrits dans le périmètre de la section.

Cette variété, qui ne signifie pas émiettement car elle est structurée par des réseaux et communautés scientifiques spécialisés, est un trait bien plus saillant que la distinction entre ce que seraient deux blocs disciplinaires, la science politique et une fraction de la sociologie. La distinction entre disciplines ne clive, ni même ne traverse, le travail réalisé par la section, même si elle constitue parfois un prisme par lequel les recrutements ou les promotions sont examinés depuis l'extérieur. Ainsi, à l'expérience, le périmètre de la section apparaît cohérent et pertinent pour construire des référentiels communs et conduire une activité collective d'évaluation. Néanmoins certains sous-domaines étroits en termes d'effectifs de chercheurs CNRS – comme l'ergonomie, notamment – renvoient à des communautés spécifiques qui ont leurs propres conventions et supports de publication, ce qui peut soulever des difficultés sur le plan de l'évaluation et de la carrière dès lors qu'elles ne sont pas représentées dans la section. Cela pose plus largement la question de leur potentielle fragilité, et de leur place dans la politique scientifique du CNRS. C'est en l'espèce un angle mort du développement de l'interdisciplinarité – que la section salue dès lors que celle-ci est conçue comme un agencement d'ancrages disciplinaires et non comme une dilution de ces affiliations. Par ailleurs, certaines traduc-

tions de la politique d'interdisciplinarité soulèvent des interrogations au vu des difficultés qu'elles peuvent générer. La section souligne qu'une attention particulière doit être accordée aux agencements entre communautés scientifiques organisées autour de référentiels distants. Ainsi les chercheurs de la section qui travaillent au sein d'unités relevant d'autres instituts peuvent parfois se trouver dans des situations délicates, soit pour affirmer leur posture disciplinaire dès lors qu'ils sont minoritaires et souvent les seuls représentants des SHS dans leurs équipes, soit pour maintenir leur insertion dans leur communauté disciplinaire. Dans certains cas ces situations peuvent même poser des difficultés en termes d'évaluation.

Si les dynamiques retracées ici tendent à renforcer la consistance du périmètre de la section 40, il ne faut pas négliger que celle-ci entretient des relations de contiguïté avec d'autres sections. Ainsi, parmi les 23 laboratoires (UMR ou UPR) rattachés à titre principal à la section, 18 ont au moins un rattachement secondaire à une autre section⁽¹⁾. De plus, lors des concours, mais aussi des demandes de promotion, nombre de candidats qui se présentent devant la section 40 le font également dans d'autres sections, et réciproquement.

II. Enjeux transversaux pour la recherche

Le travail produit par la section, dans le cadre des concours comme des évaluations récurrentes, a fait apparaître des enjeux transversaux qui sont au cœur des transformations en cours des activités de recherche (et plus généralement, du métier de chercheur) ainsi que des manières de les définir et valoriser. Ces enjeux résonnent dans les pratiques individuelles et collectives des chercheurs et des laboratoires, et ils font parallèlement l'objet de débats dans les communautés scientifiques. Et dès lors, au sein même de la section ils ont suscité des interprétations variables qui ont

été mises en discussion. C'est qu'ils renvoient à plusieurs dimensions importantes des dynamiques de l'activité de recherche : les apports et les défis de l'ouverture internationale, la centralité de l'enquête et les approches méthodologiques, la place des publications dans les productions de recherche.

A. L'ouverture internationale et les internationalisations

Si l'internationalisation de la recherche est devenue un pilier des politiques scientifiques et une priorité du CNRS, la section observe aussi qu'elle diffuse effectivement dans les pratiques de recherche, que celles-ci soient considérées à l'échelle des activités des chercheurs, des programmes des laboratoires, des parcours des candidats à l'entrée au CNRS, des dynamiques des revues. Un mouvement d'internationalisation est perceptible, à travers la circulation des idées et des textes, les mobilités de ceux qui les portent, les emprunts de concepts et de méthodes, les échanges, débats et coopérations de toute nature. Et si l'internationalisation se traduit dans un ensemble de plus en plus dense de pratiques, c'est qu'elle est perçue comme une source d'enrichissement de l'activité scientifique, des communautés, des débats, des domaines de recherche. Enjeu majeur, elle mérite d'être investie de réflexions, de réflexivité, de controverses et d'enquêtes. L'Association française de science politique a d'ailleurs publié en 2019 un rapport dont les orientations, et le titre (*Quelle internationalisation pour la science politique française?*), convergent globalement avec la manière dont la section s'est saisie de cet enjeu. À partir de débats internes récurrents, la section est conduite à appréhender l'internationalisation comme une composante essentielle de la recherche, tout en étant attachée à prendre en compte la pluralité de ses dimensions et traductions dans le travail de recherche.

La section a observé que la progression du mouvement d'internationalisation se traduit dans des formes différenciées, irréductibles à

des degrés d'intensité sur une même échelle. Ainsi, elle ne peut être réduite aux seules pratiques de publication, ne serait-ce que parce que la mesure de degrés d'internationalisation – des publications – comporte de fortes limites. La notion de publication internationale est en effet des plus incertaine : peut-elle inclure des revues françaises, et le cas échéant sur quels critères (audience, composition des comités éditoriaux) ; peut-elle rassembler toutes les revues non françaises quelle que soit la langue de publication pourvu qu'elles aient un processus de *peer reviewing* ; toutes ces revues doivent-elles être considérées comme équivalentes et le cas échéant comment les hiérarchiser ; faut-il mobiliser le critère des citations dans les supports considérés comme internationaux, etc. ? Cette approche par les publications soulève de multiples problèmes de mesure et d'indicateurs, ne serait-ce que de se doter *a minima* d'une nomenclature des supports de publication ; et nous reviendrons ultérieurement sur cette question et sur les manières de baliser et lire le paysage des revues et des éditeurs d'ouvrage. Reste que la section a pu observer, à partir des dossiers des chercheurs, une progression des publications en langues étrangères, tournées vers des communautés non francophones, et pas seulement anglophones.

Il est aussi tout à fait clair que l'internationalisation des chercheurs et des sciences sociales et politiques renvoie à une large gamme de pratiques qui peuvent être autant de moyens de développer des échanges scientifiques par delà les frontières hexagonales : les publications en langues étrangères donc, mais aussi la collaboration avec des équipes d'autres pays, la présentation de recherches dans des congrès ou séminaires internationaux, les séjours de recherche dans des établissements implantés à l'étranger, l'investissement de terrains d'enquête hors de France, la pratique de la recherche comparative et, dans tous les cas, le positionnement de ses travaux dans les débats internationaux pertinents. Au regard de cet éventail de pratiques, il est préférable de considérer des internationalisations plutôt qu'une internationalisation. Cette approche ouverte signale que ce qui est central et décisif,

ce sont les conséquences intellectuelles concrètes des internationalisations dans et pour les activités de recherche. Ces pratiques ne contribuent à l'internationalisation qu'à la condition de ne pas être érigées en critères d'évaluation univoques et discriminants ou en réponses « mécaniques » des chercheurs à des exigences qui seraient perçues comme incontournables, normatives, voire bureaucratiques. Car elles désignent des moyens pour atteindre un objectif, qui est de situer sa recherche, de quelque façon que ce soit, en dialogue avec la ou les communautés scientifiques internationales et ce faisant, de nourrir et d'enrichir la production des connaissances à cette échelle. Et c'est bien dans cette acception que la section a pu observer un net mouvement d'internationalisation des activités des chercheurs CNRS et des candidats aux concours.

Mais ce déplacement n'est pas uniforme. Les sources de modulation de ces internationalisations sont multiples, et montrent que celles-ci ne sauraient être monolithiques. Au-delà des pratiques individuelles, qui sont en tant que telles une source significative de variation, les domaines et sous-domaines de recherche ont des ancrages hétérogènes à l'international : certains se sont surtout structurés depuis l'étranger et se sont diffusés en France ensuite (ex. les études législatives, les études de la mise à l'agenda ou l'analyse de la politisation de la construction européenne); d'autres à l'inverse ont un berceau plus hexagonal, ce qui signale des particularités (méthodologiques, épistémologiques etc.) de cet espace (ex. la sociologie des professionnels de la politique ou des organisations partisanes); d'autres encore sont inscrits dans des aires, culturelles ou géopolitiques, qui mettent d'emblée en prise avec la recherche internationale, mais de manière qui peut cependant rester différentielle selon la prégnance et l'ancienneté de l'investissement scientifique et de l'exploration empirique en direction des terrains aréaux respectifs; d'autres encore portent sur des objets qui se situent à des échelles supra ou transnationales ce qui conduit d'emblée à sortir du cadre national (ex. l'analyse de l'intégration européenne et de l'européanisation de l'action publique, les relations internationales), etc. Ces internationalisations apparaissent aussi

plus diffuses dans les générations les plus jeunes, depuis celles des chercheurs recrutés dans les années 2000 jusqu'à celles des candidats actuels aux concours CR. La période de formation à la recherche et de socialisation professionnelle n'est pas neutre, même si un grand nombre de chercheurs rattachés à la section pratiquent des formes affirmées d'internationalisation, qui se renforcent avec l'avancée en carrière. Pour les plus jeunes, l'internationalisation par les publications (articles, livres ou chapitres publiés dans des supports académiques en langues étrangères) semble tendanciellement plus précoce.

L'exacerbation de la compétition pour l'obtention de postes de chercheurs est un vecteur de développement de cette internationalisation par les publications, mais aussi par les séjours de recherche à l'étranger. Pour autant, cette dynamique n'est pas uniforme, parce qu'elle est dépendante de ressources réparties de manière inégale, ce que souligne aussi le rapport de l'AFSP. Ces inégalités ne facilitent pas un engagement serein dans un mouvement qui est pourtant en tant que tel positif et productif. L'analyse des dossiers de candidature aux concours de recrutement comme chargé de recherche montre une variabilité des ouvertures internationales en fonction de lieux de formation, des écoles doctorales, des activités postdoctorales. Les asymétries de ressources semblent cumulatives, favorisant les cursus réalisés dans des filières prestigieuses ou sélectives, les rattachements à de grosses UMR elles-mêmes associées à des établissements bien dotés en moyens, sans compter les inégalités territoriales jouant au profit des implantations parisiennes. Accéder à des informations pertinentes, recueillir des encouragements, s'inscrire dans des réseaux constitués par d'autres, bénéficier de dispositifs d'échange institutionnalisés, recevoir des soutiens financiers, sont autant de facteurs inégalement distribués qui soutiennent à intensité variable les internationalisations. Ces facteurs de variations ont des effets perceptibles sur les activités et parcours des candidats aux concours. Et ils sont d'autant moins neutres pour les chercheurs CNRS en poste que les soutiens fournis par les tutelles comme le CNRS ne sont pas toujours adaptés ou bien repérés.

Le développement des internationalisations dépend de politiques institutionnelles de soutien, à la fois pour contrecarrer les logiques inégalitaires repérées et pour entretenir la circulation internationale depuis la France et vers celle-ci. L'expérience accumulée au sein de la section conduit celle-ci à formuler plusieurs constats et remarques sur ce point.

– L'attractivité internationale du CNRS apparaît robuste si l'on en juge par le nombre de candidats aux concours qui ont été formés ou occupent des postes académiques – généralement temporaires – à l'étranger. Ainsi, près de 25% des candidatures aux concours de chargé de recherche comptaient une soutenance de thèse et/ou un séjour de recherche doctoral ou post-doctoral dans un établissement à l'étranger, et la majorité avait fréquenté des grands congrès ou colloques internationaux. En revanche l'ambition en matière d'internationalisation affichée par le CNRS ne trouve pas de traduction concrète pour le concours de directeur de recherche, en raison de contraintes problématiques. En effet, les conditions d'organisation du concours entravent les possibilités de recrutement de chercheurs occupant un poste à l'étranger, alors même qu'à cette étape de la carrière le rayonnement international peut être plus aisément identifié.

– Un autre pan de la politique portée par l'InSHS concerne la traduction de textes publiés en français, vers l'anglais. Il s'est concrétisé notamment par le soutien financier à la traduction intégrale de quelques revues, sur la base d'une par discipline. Du point de vue de la diffusion, et même si aucune évaluation systématique et approfondie de cette politique publique n'a été produite à notre connaissance, les résultats de cette politique apparaissent décevants, ce que relève aussi le rapport de l'AFSP. Pour la section, il apparaît bien plus utile et efficace de développer une politique de soutien à la traduction ou à la relecture / corrections (*editing*) de textes rédigés en vue d'une soumission à une revue identifiée à l'avance et publiée dans une langue étrangère, c'est-à-dire de textes conçus pour être ajustés à la fois au support visé et pour s'adresser à une audience internationale. De

telles politiques de soutien à la publication directe dans des revues internationales non francophones sont mises en place par certains laboratoires ou établissements. Ces initiatives sont positives, mais elles comportent le risque d'accuser des asymétries d'accès à ce type de ressource. Le soutien à la traduction d'ouvrages – et non de revues ou d'articles – vers l'anglais pourrait aussi être un complément utile à une meilleure diffusion des productions françaises.

– Favoriser la mobilité est un autre levier de développement de l'internationalisation, qu'il s'agisse de séjours à l'étranger ou à l'inverse de l'accueil de collègues depuis l'étranger. De nombreux instruments ou dispositifs existent, qui restent cependant dispersés et peu lisibles, et la diffusion d'une information exhaustive et claire permettrait d'inciter les chercheurs à s'en emparer. La section considère que l'enjeu est important parce que de multiples formes d'internationalisation (publication, coopération sur projets, participation à des réseaux pérennes, obtention de financements internationaux sélectifs) sont favorisées par des séjours dont la durée est suffisamment significative pour permettre une insertion efficace du chercheur en mobilité et des interactions et synergies assez consistantes. Enfin, si la présence des chercheurs et équipes au sein des programmes européens (ERC, PCRD, etc.) reste limitée, c'est aussi en raison du caractère chronophage des candidatures et montages de projets. Sur ce plan, la recherche française est pénalisée, au regard de nombre d'autres pays européens, par le manque de soutiens en termes d'ingénierie de projets et de personnels d'appui dotés de fortes compétences en ce domaine (voir à ce sujet *infra* les constats sur les évolutions des effectifs d'ingénieurs et techniciens).

B. Centralité de l'enquête et approches méthodologiques

Les travaux des chercheurs aussi bien en science politique qu'en sociologie sont marqués par une profondeur empirique affirmée.

Dans ce cadre les démarches méthodologiques adoptées sont très variées, attestant d'une richesse de la recherche française. Cette variété méthodologique apparaît vivace, notamment au regard de tendances internationales, peut-être plus affirmées en science politique qu'en sociologie, valorisant les méthodes quantitatives, les données issues de vastes *surveys*, ou la formalisation. Pour la section, ces différences peuvent être lues de deux manières non contradictoires : d'un côté elles soulignent des spécificités et atouts de la recherche française, qui a accumulé des expertises diversifiées et notamment articulées à d'autres disciplines telles l'histoire, l'anthropologie ou la philosophie ; d'un autre côté elles montrent que d'autres expertises sont insuffisamment développées, notamment en matière de méthodes statistiques ou de modélisation. Ces deux versants sont indissociables, et sont les ferments d'un pluralisme méthodologique, et plus largement épistémologique, qui constitue un atout pour la vitalité des disciplines. Dans les deux cas, on peut observer que les recherches conduites ont un ancrage empirique solide, et sont adossées à des matériaux consistants. La place éminente donnée à l'enquête est – et demeure – dès lors une caractéristique saillante de la production scientifique. Il apparaît à la section que cette place doit être préservée et consolidée, et qu'en conséquence doivent être améliorées et renforcées les conditions qui la rendent possibles : financement de la construction de bases de données (quantitatives et qualitatives), soutiens à la réalisation de grandes enquêtes, allocation de ressources permettant de faire des enquêtes de terrain approfondies, prise en compte des temporalités spécifiques aux différentes démarches d'enquête, etc.

La section a pu observer, à partir des dossiers de candidature et des rapports d'activité des chercheurs, combien les démarches qualitatives sont vivaces et développées. Un mouvement de diversification des méthodes d'enquête est bien affirmé : si les entretiens, qui dessinent un spectre très large, et le travail documentaire dominant, ils sont souvent complétés, dans des démarches multi-méthodes, par des approches ethnographiques, très diverses elles aussi, des observations, des entretiens

collectifs et *focus groups*, mais aussi des suivis longitudinaux ou encore l'exploration de protocoles de ré-analyse, etc. Dans cet ensemble, la référence à l'ethnographie gagne du terrain et apparaît de plus en plus valorisée, pas seulement pour l'étude de populations, de communautés ou de territoires, mais aussi dans les enquêtes au sein d'organisations, publiques ou privées, locales, nationales ou internationales, visant à saisir les activités de gouvernement, d'expertise, d'administration, de travail, etc. Ce mouvement est révélateur de capacités croissantes des chercheurs à pénétrer dans des cercles et mondes sociaux variés et à s'y faire accepter. Il est aussi très prometteur, à condition que soient amplifiés des efforts d'explicitation, voire de formalisation, de la démarche (comment sont construites les situations d'observation, quels outils sont déployés pour observer, dans quelle temporalité s'inscrit l'ethnographie, comment sont traitées les données, etc.). De façon complémentaire, les investissements effectués sur la réalisation de l'enquête ne trouvent pas encore systématiquement leur pendant dans l'explicitation des modes de traitement des matériaux collectés et la formalisation des méthodes d'analyse, qu'il s'agisse d'entretiens, d'archives, de carnets d'observations. La littérature internationale entretient pourtant des controverses importantes sur le traitement des données qualitatives, et les marges de progrès apparaissent ici sensibles.

Les approches quantitatives occupent une place minoritaire, dans les programmes des chercheurs comme dans les projets des candidats, même si la tendance est au développement de leur usage. Les écarts sont particulièrement significatifs en ce qui concerne les approches méthodologiques les plus récentes, telles que les méthodes expérimentales (sondages expérimentaux, expériences contrôlées avec groupes témoins, etc.) qui sont peu mobilisées dans le contexte français. De manière plus large, s'agissant des approches quantitatives, la situation française tranche avec d'autres pays où ces méthodes sont bien implantées, en science politique comme en sociologie. Aussi, dans certains domaines, le développement de la recherche est ralenti par des difficultés à constituer, faute de masse cri-

tique, des équipes contribuant à de grandes enquêtes internationales, à trouver des financements pour mener et exploiter de telles enquêtes en France. Ainsi, par exemple, de nombreux aspects de l'élection présidentielle de 2017 sont restés inexplorés, et l'analyse du rôle des médias et des réseaux sociaux dans les campagnes électorales a pris du retard par rapport à d'autres pays européens, faute de moyens (humains et financiers) suffisants.

De plus, l'investissement dans des méthodologies appuyées sur l'ingénierie numérique, que ce soit pour la constitution de corpus (*web crawling*, *web scraping*), l'analyse quali-quantitative (*text mining*, analyse de réseau, analyse bibliométrique), les outils de modélisation et de visualisation (cartographie, infographie), apparaît insuffisant alors que l'importance croissante des web data ouvre des défis importants pour les sciences sociales et politiques. Ce diagnostic est plus inquiétant s'agissant de la jeune recherche, et il justifierait plus largement que, en convergence avec les priorités scientifiques de l'InSHS, l'on se donne les moyens de développer davantage la formation doctorale et la formation continue, ainsi que de doter les laboratoires en ingénieurs spécialisés dans ces domaines.

Enfin, une inflexion importante des recherches concerne le développement de démarches comparatives. C'est une dimension des mouvements d'internationalisation, et aussi un corollaire de certaines questions de recherche, par exemple celles qui portent sur des phénomènes qui circulent et traversent les frontières (ex. l'expertise économique, les migrations, le commerce international), sur des acteurs et institutions qui se situent à une échelle supranationale (ex. l'Organisation mondiale de la santé, les institutions de l'Europe, les méthodes coordonnées d'action publique), sur des terrains étrangers (au Sud comme au Nord), ou sur des questions les plus diverses pour lesquelles les approches comparées apportent un renouvellement des connaissances. Il est clair que la comparaison intra-européenne, qui est encouragée par les programmes de recherche européens, n'épuise pas cet élan pour l'ouverture internationale des

terrains et pour le comparatisme. Le développement de la sociologie comparée n'est pas, du fait de son ampleur, sans soulever certaines interrogations. C'est ainsi que la comparaison est parfois reçue comme une quasi-norme notamment par des candidats aux concours de chargé de recherche. Cependant, il faut rappeler que la construction de la comparaison appelle des argumentations spécifiques tant sur le choix des cas étudiés, leur statut de cas, la plus-value attendue et symétriquement les limitations qui en résultent, les opérations méthodologiques permettant de l'opérationnaliser, etc. Il y a là un chantier d'accumulation d'expériences et de mutualisation des réflexions qui mériterait d'être soutenu et structuré afin que la comparaison ne se dégrade pas en routine ou en norme implicite.

C. Les publications et le métier de chercheur

Un troisième enjeu transversal à la recherche émerge des dossiers des chercheurs rattachés à la section et des candidats aux concours : il concerne les évolutions du métier de chercheur. Celui-ci apparaît marqué par une diversification croissante de ses composantes, ce qui est lisible dans le caractère systématique des activités d'enseignement, dans le poids croissant de l'insertion dans des projets collectifs, ou dans l'exercice de responsabilités variées et de tâches administratives. Cela constitue un enrichissement évident du métier, mais ouvre vers une série d'interrogations relatives à la définition et la conduite de programmes de recherche personnels, et à la place des publications dans l'ensemble plus vaste des productions et activités des chercheurs.

Les facettes du métier de chercheur sont multiples, et débordent de beaucoup la mise en œuvre de projets de recherche et la publication des résultats obtenus. Cette variété est déjà patente dans les dossiers des candidats à l'entrée au CNRS qui, en parallèle de la réalisation de leur thèse comme dans la période

postdoctorale, ont très souvent eu de multiples engagements professionnels : dans l'enseignement, dans la participation à des équipes de recherche, dans l'organisation de séminaires, colloques ou sessions dans des congrès, dans la coordination de publications collectives, dans l'évaluation d'articles pour diverses revues, autant d'engagements qui s'ajoutent à des activités plus classiques comme la publication d'articles ou de livres, ou encore la présentation de travaux lors de colloques et congrès. Si un tel investissement de ces facettes du métier est attendu pour les chercheurs expérimentés, il est de plus en plus affirmé chez les candidats à l'entrée au CNRS. Cela indique que ces derniers sont, pour nombre d'entre eux, solidement insérés dans les milieux de la recherche, dans des équipes de travail, dans des communautés professionnelles. Cela suggère aussi une élévation sensible des exigences implicites assignées à ces candidats, résultant du contexte de compétition exacerbée dans lequel ils sont plongés.

De manière générale, il est souhaitable, et nécessaire au fonctionnement des communautés et institutions scientifiques, que les chercheurs s'engagent dans une multiplicité d'activités et, à l'inverse, ne se cantonnent pas à la seule réalisation de projets de recherche et leur corollaire, la publication. Exercer des responsabilités au sein d'équipes de recherche, de réseaux thématiques, d'associations scientifiques, de comités éditoriaux, mais aussi de laboratoires, de filières de formation, d'établissements d'enseignement supérieur, de conseils scientifiques, d'organismes d'administration de la recherche, d'instances d'évaluation, d'agences de financement, de comités d'experts, sont autant d'activités qui relèvent pleinement de l'exercice du métier de chercheur. Elles représentent des investissements légitimes, qui doivent donc être reconnus et valorisés dans les évaluations car elles contraignent, de manière diverse, le temps qui peut être alloué à la recherche proprement dite et par conséquent à ses débouchés directs que sont les publications. Elles doivent cependant être modulées au cours de la carrière et leur intensité doit être contrôlée de manière à ne pas éloigner le cher-

cheur du cœur de métier, à savoir la recherche elle-même. En l'espèce il n'existe pas de normes partagées, et la variété des manières d'exercer le métier de chercheur est patente, et souhaitable. Toutefois, il apparaît à la section que des responsabilités lourdes, comme par exemple celle que représente un poste de directeur d'unité notamment, ne devrait qu'exceptionnellement (petites équipes, codirection collégiale, périodicité courte) être confiées à des chargés de recherche et, au contraire, être encouragées comme une expérience capitale de la carrière de directeur de recherche.

Classiquement les publications représentent un élément central de l'évaluation des chercheurs. La section 40 le reconnaît, sans toutefois mettre en œuvre de critère bibliométrique ou de méthode de mesure de la production, et *a fortiori* de la productivité des chercheurs. Elle considère que la place accordée aux publications doit également faire l'objet d'une réflexivité critique. La première raison est qu'il est attendu des chercheurs qu'ils s'engagent dans d'autres activités, qui tantôt soutiennent et tantôt limitent la publication. La seconde est que le comptage des publications est un moyen illusoire d'apprécier l'intensité comme la qualité de l'activité, parce que les pratiques et les référentiels varient selon les domaines et que les supports de publication sont hétérogènes en termes de sélectivité et d'évaluation par les pairs. La troisième, et non la moindre, est que les publications ne valent que par leur apport au renouvellement des connaissances, lequel ne peut être saisi qu'après une lecture attentive des contenus que les conditions d'évaluation ne permettent malheureusement pas toujours. Ce sont pourtant bien les textes qui doivent être évalués et les apports de connaissance qui doivent être appréciés.

Pour surmonter ces difficultés, une option répandue consiste à accorder une attention spécifique au statut des supports de publication, partant de l'idée, évidente, que tous les supports ne se valent pas en matière d'exigence scientifique. On sait que le *peer-reviewing* est en la matière une référence

incontournable. C'est aussi une référence opaque, car elle couvre des pratiques très hétérogènes en matière d'évaluation de textes. C'est encore une référence insuffisante car elle définit un périmètre extrêmement large et formellement indifférencié de revues dites à comité de lecture. Celles-ci ne sont pas toutes équivalentes. Mais la section 40 a considéré pourtant qu'il est impossible de produire un classement des revues de son domaine, car l'hétérogénéité des revues ne peut être ramenée à une seule dimension qui organiserait la hiérarchie : des revues sont généralistes et d'autres spécialisées, des revues sont internationales et d'autres nationales, voire locales, des revues sont publiées en langues étrangères et d'autres francophones, des revues sont anciennes et d'autres émergentes, des revues sont imprimées sur support papier et d'autres exclusivement électroniques, des revues sont payantes et d'autres en *open access*, etc. Or, les unes (par exemple : généralistes, internationales, en langues étrangères, anciennes, imprimées, payantes) ne sont pas nécessairement inférieures, ou supérieures, aux autres. Chacune de ces catégories est hétérogène dans divers plans : procédures d'évaluation, intensité de la sélection, exigences scientifiques, etc. De plus cette hétérogénéité n'est pas toujours lisible : le statut de nombre de revues spécialisées n'est connu que des spécialistes du domaine, celui de nombre de revues publiées en langues étrangères peut être difficile à cerner, etc. Aucun critère univoque ne permet d'établir une hiérarchie claire, et bien entendu pas même le facteur d'impact, dont les analyses critiques sont désormais bien connues. Certes certaines revues occupent, de l'avis général, une place centrale dans leur discipline ou dans leur domaine, mais ce critère de centralité ne permettrait tout au plus que de délimiter un noyau restreint au regard des revues dans lesquelles les chercheurs publient effectivement, et non de produire une hiérarchie des revues. Et la taille forcément réduite d'un tel noyau limiterait son intérêt pour l'appréciation des publications. Restent donc les contenus, et les apports aux domaines de recherche et disciplines.

Un raisonnement similaire doit être tenu pour les ouvrages (et les contributions à des ouvrages), qui sont considérés dans les domaines du périmètre de la section 40 comme des publications légitimes, au même titre que les articles dans les revues scientifiques, en complément de ceux-ci et réciproquement. Ici aussi les éditeurs, et à un degré plus fin les collections, sont hétérogènes, et aucun critère opérationnel ne permet de les classer. Le *peer reviewing* est aussi un référentiel majeur, mais les pratiques en la matière sont souvent hétérogènes et, par ailleurs, peu lisibles. Au moins est-il nécessaire, et possible, d'effectuer quelques distinctions élémentaires dans les présentations des bibliographies : ouvrages de recherche rendant compte de résultats originaux, ouvrages de synthèse, « à thèse » ou constituant une introduction à un domaine de recherche, ouvrages à vocation de manuels pour étudiants.

Dans le prolongement, la variabilité des normes de qualité des publications ne doit pas occulter la nécessité, pour les chercheurs et les candidats aux concours du CNRS, de mieux respecter quelques règles élémentaires dans la présentation des listes de publication, en distinguant notamment les catégories d'ouvrages, les revues scientifiques à comité de lecture et les autres revues, les articles, les chapitres d'ouvrages, et d'autres textes publiés, comme les notes de lecture publiées dans des revues scientifiques à comité de lecture, les notices de dictionnaire, les préfaces ou postfaces, etc. Quelques recommandations apparaissent également utiles au vu des dossiers examinés par la section pour organiser les pratiques de publication : varier les supports, entre revues et livres, revues généralistes et revues spécialisées, revues nationales et revues internationales ; limiter les publications dans les supports où l'on exerce des responsabilités éditoriales ; ne pas négliger les publications en nom propre quand l'organisation de la recherche autour d'équipes et projets collectifs favorise grandement la co-signature, qui est par ailleurs une pratique légitime.

III. Organisation et moyens de la recherche

Les moyens alloués à la recherche par le CNRS se traduisent dans de multiples dispositifs : recrutements de personnels scientifiques et techniques, soutiens de base aux laboratoires, financements de GDR et écoles thématiques, aides à la mobilité internationale, politiques de soutien en direction des revues, plus rarement appels à projets, etc. La section 40 se concentre ici sur ce qui représente la part la plus importante des moyens, et sur ce qui accapare la part la plus grande du travail de la section : les concours et le renouvellement du corps des chercheurs, les laboratoires et leur place dans ces mouvements, le fonctionnement des revues, les évolutions de la démographie des chercheurs et de leurs carrières, mais aussi des ingénieurs et techniciens.

A. Les concours : sélection et manque de postes

Le nombre de postes ouverts aux concours chargés de recherche⁽²⁾ a décliné sensiblement pendant la dernière période, les niveaux les plus bas concernant les années récentes : 4 en 2019, 5 en 2018 et 2017, contre 6 en 2016 et 9 en 2015. La diminution du nombre de postes ouverts pour la section 40 traduit une tendance similaire à l'échelle de l'organisme, tout en étant accentuée par la croissance du nombre de postes ouverts dans les CID qui se fait au détriment du recrutement par les sections même si les chercheurs recrutés par les CID sont ensuite rattachés à une section. Alors que le nombre de recrutements en section 40 diminuait, le nombre de candidats demeurait tendanciellement au niveau ou au-dessus de la barre de 200 (cf. tableau 1). Aussi le ratio poste / candidats admis à concourir s'est sensiblement dégradé au cours de la dernière période,

atteignant un pic en 2019 avec près de 50 candidats pour un poste⁽³⁾.

Tableau 1 : Évolution des postes ouverts aux concours CR et du nombre de candidatures.

Concours CR	Postes	Candidatures	Ratio
2019	4	193	48/1
2018	5	207	41/1
2017	5	230	46/1
2016	6	234	39/1
2015	9	242	27/1
2014	6	215	36/1
2013	8	255	32/1
2012	6	233	39/1

Au vu de ces chiffres, les concours apparaissent fortement sélectifs, et de plus en plus alors même que le nombre de candidats tend à fléchir. Ils le sont d'autant plus quand on prend en compte les propriétés des dossiers des candidats. Sur la base des trois dernières années, la section a constaté, nonobstant de fortes disparités dans la qualité des dossiers, qu'une trentaine à une quarantaine de dossiers étaient excellents au regard des critères d'évaluation affichés, auxquels s'ajoutaient une trentaine d'autres dossiers prometteurs et de très bon niveau. Cela montre les écarts entre le potentiel de recherche et les opportunités de le réaliser à travers un recrutement au CNRS.

Par ailleurs, ces dossiers montrent combien les candidats sont déjà investis dans le métier de chercheur. Ils comptent des publications significatives, dont *a minima* des articles dans des revues centrales ou importantes, et cela même pour les candidats qui viennent de soutenir leur thèse. S'y ajoutent de multiples signaux d'intégration professionnelle : communications dans des congrès nationaux et internationaux, organisation de manifestations scientifiques, animation de séminaires, participation à des projets collectifs. Le passage par des contrats postdoctoraux est quasi systéma-

tique ; il commence généralement immédiatement après la thèse et se prolonge souvent pendant plusieurs, voire de multiples, années. Les expériences internationales, sous la forme de séjours de recherche pendant la thèse ou de contrats postérieurs à la soutenance sont fréquentes. À cela s'ajoute encore la qualité des programmes de recherche élaborés en vue du concours : ils témoignent souvent d'une belle inventivité dans la formulation des questions de recherche, d'une bonne connaissance de la littérature internationale sur le sujet, d'une solide maîtrise de savoir-faire méthodologiques, de combinaisons pertinentes entre des objets fermement délimités et des enjeux théoriques clairement définis.

La solidité de ces dossiers de candidature montre, en creux, la somme des exigences auxquelles les candidats ont satisfait en amont du concours : réalisation d'une bonne thèse bien évaluée par le jury ; confrontation à l'évaluation par les pairs dans des revues reconnues ; haut niveau d'activité de publication ; investissement de multiples aspects du métier ; mobilités variées, en termes d'équipes de recherche, d'institutions, de pays également ; résistance face une précarité résultant de contrats de court terme. Ainsi, ces candidats sont plongés dans des situations professionnelles marquées par de fortes incertitudes et doivent parallèlement y être engagés de manière intensive dans la durée afin d'enrichir leur curriculum vitae, d'accumuler des ressources, et d'accéder, un jour peut-être, à une position stabilisée. Cette accumulation d'exigences résultant d'une concurrence exacerbée est problématique pour les personnes concernées. Elle est aussi grosse de risques, en particulier sur les manières de faire de la recherche, ou de concevoir un programme de recherche. Car les tensions sur le marché du travail académique peuvent favoriser la recherche de conformité à des normes dont l'émergence et la consistance relèvent d'une production collective diffuse plutôt que de l'explicitation de standards par la section. Un indice patent réside dans la croissance des approches comparatives dans les programmes de recherche, comme si la comparaison était incontournable et nécessaire à mettre en œuvre pour tout objet ou problématique de

recherche, alors que dans nombre de cas elle est mal justifiée et même fragilise des projets qu'elle était supposée renforcer. L'originalité et l'inventivité sont des ressorts majeurs de la recherche dans nos domaines, et les risques sont élevés qu'ils soient de plus en plus écrasés par une concurrence excessive et délétère dans ses effets sur la conception des projets de recherche.

Au regard de cette situation il est légitime de se demander ce qui fait résister le mieux à ce cumul d'exigences et de précarités, et quelles sont les propriétés saillantes des lauréats, des chercheurs recrutés. Les personnes recrutées dans le corps des chargés de recherche au cours des trois dernières années sont au nombre de 14. Parmi elles on compte 7 femmes et autant d'hommes⁽⁴⁾. Elles présentent une variété de profils en termes de profondeur temporelle du parcours de recherche, que l'on peut apprécier par les durées écoulées entre le recrutement et la soutenance de thèse : cette durée est inférieure à 2 ans dans 4 cas, supérieure à 6 ans dans 4 autres cas, et comprise entre 3 et 5 ans dans 6 cas. Il apparaît aussi qu'une si forte sélection conduit à favoriser certains profils de candidature plutôt que d'autres, en particulier les candidats qui ont pu accumuler au plus tôt dans leur parcours les ressources permettant de surmonter l'intense sélection. Un indicateur comme le passage par un séjour d'au moins six mois dans une institution académique à l'étranger en atteste, puisqu'il est présent dans 12 des 14 parcours des lauréats des concours sur la période 2017-2019. Les établissements de préparation et de soutenance de thèse présentent aussi une forte concentration : l'IEP de Paris y figure 4 fois, l'EHESS 3 fois, des établissements à l'étranger 2 fois, des co-cutelles internationales 3 fois, et d'autres établissements français – en l'occurrence, tous situés en province – 3 fois. Il apparaît donc que, en dépit de leur variété, les parcours des lauréats concentrent ces propriétés sélectives, qui sont des indicateurs d'inégal accès à des ressources fonctionnant comme des indices de l'« excellence » de ces parcours – une notion que la section a pourtant questionnée de manière directe et critique.

Ces inégalités sont sans doute amplifiées par les conditions de préparation des projets de recherche présentés à l'appui des candidatures et d'entraînement aux auditions. Sur ces deux points, le rôle des laboratoires auprès des candidats s'est considérablement renforcé au cours des dernières années, à travers l'évaluation des projets et l'accompagnement dans leur élaboration et à travers la préparation à l'audition (sous la forme d'audition dite blanche). Un bilan de ces pratiques, qui se sont accentuées sans doute parce que le nombre de recrutements diminuant les probabilités d'accueil d'un nouveau chercheur au CNRS diminuaient également, reste à faire. Mais elles sont indéniablement des facteurs supplémentaires d'inégalités. Aussi on peut s'interroger sur la pertinence de demander des vœux d'affectation dans les dossiers de candidature dans la mesure où cela tend à renforcer ce rôle des laboratoires dans la mise au point des composantes majeures des candidatures que sont les programmes de recherche et les auditions.

B. Les laboratoires et la concentration des ressources

Les laboratoires rattachés à titre principal à la section 40 sont, en septembre 2019, au nombre de 25, comprenant 22 UMR, 1 UPR, 1 UMS et 1 USR (source Labintel). S'y ajoutent une cinquantaine d'unités variées (UMR, UMS, USR, FRE, UMI) qui ont un rattachement secondaire à la section 40. La distribution géographique des unités de recherche en rattachement principal est nettement déséquilibrée, avec une concentration sur l'Île de France et même dans la ville de Paris (cf. tableau 2). Les déséquilibres sont accentués pour les chercheurs rattachés à la section 40⁽⁵⁾. En effet, sans compter l'accueil éventuel de chercheurs d'autres sections, les unités parisiennes en comptent 8,6 en moyenne contre 4,8 pour les unités situées en province.

Tableau 2 : Distribution géographique des UMR en rattachement principal à la section 40 et de leurs chercheurs en septembre 2019.

	UMR (section principale 40)	Chercheurs (section 40)
Paris	8	69
Reste Ile de France	2	10
Hors Ile de France	12	58

La concentration n'est pas seulement géographique. Elle se lit aussi à l'échelle des laboratoires puisque, dans le périmètre considéré, 7 UMR, soit près d'un tiers de l'ensemble, comptent au plus 3 chercheurs, quand 5 en comptent 4 à 6, 6 en comptent 7 à 9, 2 en comptent 10, et 2 plus de 10⁽⁶⁾. De plus, 4 de ces UMR ne comptent aucun directeur de recherche rattaché à la section 40. Ces chiffres ne sauraient être interprétés comme des indices de dynamisme scientifique, tant la localisation géographique compte dans l'attractivité, pour les affectations à l'issue des recrutements comme pour les mobilités en cours de carrière. On observe ainsi que des laboratoires qui ont su développer des identités scientifiques originales sont pourtant fragilisés.

Cela est d'autant plus préoccupant que les déséquilibres géographiques et entre unités ne sont pas en voie de résorption, au contraire puisque se dessine une tendance à la polarisation⁽⁷⁾. Les explications sont multiples : les affectations consécutives aux recrutements sont distribuées de manière inégale, sans compter les mutations en cours de carrière et les départs à la retraite qui risquent d'accroître ces tendances (même s'il est difficile de les décrire avec précision). Les 63 chargés de recherche recrutés depuis 2008 ont été affectés dans 29 laboratoires différents, mais la moitié est concentrée dans 7 laboratoires (dont 2 ont bénéficié chacun de 6 affectations sur la période soit 20% des recrutements au total). Sur les trois dernières années, les 14 chargés de recherche recrutés ont été affectés dans 9 laboratoires différents, et 6 d'entre eux ont pris un poste en dehors de Paris.

Les laboratoires demandés par les candidats dans leurs vœux d'affectation ne constituent

aucunement un critère de sélection, et la section n'y accorde pas d'attention lors des phases du concours. Si les décisions d'affectation relèvent de l'InSHS, la section est attentive à ce qu'elles prennent en compte les déséquilibres actuels et contribuent à une meilleure répartition des chercheurs, sans compromettre le sens proprement scientifique de ces affectations. Celles-ci constituent un enjeu majeur pour la vitalité des laboratoires et pour la survie de certains d'entre eux, et cela d'autant plus que le nombre de postes est faible, et que la politique de sites est grosse du risque de concentration croissante des ressources sur un nombre restreint de laboratoires. Ces constats désormais connus appellent une politique plus volontariste de rééquilibrage afin de préserver toute la variété des programmes et potentialités de recherche.

C. Les revues et leur fonctionnement

Les revues sont une composante importante de la vitalité des communautés scientifiques, de la diffusion des connaissances, et de l'évaluation de la recherche à travers le *peer reviewing*. Dans le périmètre de la section, une trentaine de revues sollicitent un soutien du CNRS, ce qui conduit la section 40 à examiner périodiquement la qualité scientifique de celles-ci. Actuellement cette évaluation est répétée tous les deux ans, ce que la section juge comme une périodicité trop rapprochée, pour deux types de raisons. Sur le fond d'abord, il est exceptionnel qu'en l'espace de deux années la qualité d'une revue ait fortement changé, dans un sens ou l'autre, de sorte que l'évaluation pourrait être espacée. L'autre raison est pragmatique : la charge que représente l'évaluation de 28 revues (c'est ce qui a été effectué en 2017) est très lourde, et celle-ci pourrait être effectuée de manière plus approfondie si tous les deux ans la moitié des revues étaient évaluées, chacune étant soumise à évaluation sur un rythme quadriennal. Une telle évolution permettrait de procéder à des

évaluations plus approfondies, prenant en compte à la fois la qualité des articles publiés, la politique éditoriale et le projet scientifique poursuivis, et le fonctionnement de la revue (modalités d'évaluation, transparence sur les procédures, modes de prise de décision, degré de collégialité, formes de communication avec les auteurs, etc.). Cela permettrait aussi à la section de contribuer, sur la base d'évaluations plus complètes, à la réflexion collective sur le paysage des revues, sur la diversité de celles-ci, sur les modes de catégorisation, voire de hiérarchisation, des supports de publication.

Enfin, la section considère que la politique initiée par l'InSHS de soutien à la traduction vers l'anglais d'articles parus dans des revues françaises ne permet pas d'améliorer significativement la diffusion internationale de la recherche française. Elle préconise, comme souligné précédemment dans ce rapport, d'y substituer une politique de soutien à l'*editing* en vue de favoriser la publication dans des revues internationales en langue étrangère, en complément du soutien actuel aux revues françaises.

D. Démographie et carrières

Les effectifs de chercheurs, ingénieurs et techniciens relevant de la section 40 se situent fin 2019 à 197 chercheurs et 115 IT, selon la base Labintel (recensement effectué le 20 septembre). Parmi les sources permettant de dénombrer les personnels, celle-ci peut être considérée comme fiable car c'est une base nominative. En revanche, elle ne permet pas de retracer des évolutions temporelles et elle fait l'objet d'actualisations récurrentes de sorte que les données apparaissent instables car actualisées fréquemment.

Les effectifs des ingénieurs et techniciens CNRS affectés dans des unités rattachées à la section 40 à titre principal sont restés stables sur la période 2013-2017, passant de 106 à 109 (source bilan social du CNRS). Sur la période les mouvements ont été marqués par une crois-

sance conduisant à un pic (de 115) en 2015 suivi par une décroissance. Ces évolutions résultent de soldes entre des entrées et des sorties. On observe ici que les concours externes ne compensent pas, loin s'en faut, les départs en retraite : sur la période le déficit est de 15 postes (13 entrées par concours externes et 28 départs à la retraite). Ainsi donc les IT ont été fortement touchés par la politique de baisse des recrutements adoptée par le CNRS. Ce ne sont donc pas les créations de postes (concours externes) qui expliquent le maintien des effectifs sur la période. C'est principalement le solde des mouvements internes, entre mobilités sortantes (9 entre 2013 et 2017) et entrantes (38 entre ces deux dates).

La distribution des IT au sein des unités est fortement différenciée. Ainsi, selon les données du Labintel parmi les UMR rattachées à la section à titre principal 10 compte 1 à 2 IT tandis qu'à l'opposé 5 en comptent 8 et plus. La présence d'IT non CNRS – dont l'effectif estimé voisine la centaine au sein de ces unités – ne compense assurément pas ces inégalités tant les ressources sont différentes selon les établissements. Concernant les IT CNRS, une majorité se trouve dans le corps des ingénieurs d'études ($n = 40$) et des assistants ingénieurs ($n = 36$). Viennent ensuite les techniciens ($n = 20$), puis les ingénieurs de recherche ($n = 18$) et les adjoints techniques de la recherche ($n = 1$). La part des femmes parmi les ingénieurs et techniciens est de 76 %, contre 24 % pour les hommes. Proche de cette moyenne dans les corps des ingénieurs d'études (IE) et des assistants ingénieurs (AI), elle atteint 85 % dans le corps de catégorie B des techniciens (TC) mais n'est plus que de 61 % dans celui des ingénieurs de recherche (IR)⁽⁸⁾.

Le ralentissement des recrutements externes n'a pas seulement des effets sur le fonctionnement des laboratoires, mais aussi sur la démographie des corps. La distribution des âges est fortement déséquilibrée⁽⁹⁾ : 40 % des IT a plus de 50 ans, 21 % seulement a moins de 40 ans, et 39 % se situe dans la tranche d'âges intermédiaire. Ces ingénieurs et techniciens sont répartis dans cinq branches d'activité professionnelles (BAP). La BAP E (informa-

tique, statistique et calcul scientifique) et la BAP G (patrimoine, logistique, prévention et restauration) ne concernent respectivement que 10 et 1 seul agent. La branche d'activité la plus importante est la BAP J (gestion et pilotage), avec 49 IT. Ceux-ci exercent des activités transversales d'accompagnement de la recherche : gestion administrative et financière des unités, valorisation, coordination des réponses aux appels à projets, recherche de financements... Les BAP F (documentation, culture, communication, édition, TICE) et D (sciences humaines et sociales, production et traitement de bases de données) comptent respectivement 32 et 23 agents.

Ces branches d'activité professionnelle recouvrent des compétences et savoir-faire hautement spécialisés⁽¹⁰⁾, et indispensables au fonctionnement des UMR (on pense notamment aux fonctions de gestion et au fait que certaines UMR ont très peu de personnel IT) comme au développement des équipes de recherche. Dans une période où la recherche en sciences politiques et sociales est devenue indissociable du montage de projets, de la réponse à des appels d'offres, de la gestion de personnel temporaire, mais aussi de la constitution de bases de données – issues des *big data* par exemple – ou encore de l'exploitation de larges corpus, il est nécessaire non seulement de renouveler ces agents, mais encore de créer des emplois afin d'accompagner les transformations des pratiques de recherche. Cette exigence était soulignée dans les rapports de conjoncture de 2010 et 2014 de la section 40. En 2019 elle demeure d'autant plus impérative que ces appels n'ont pas été entendus, puisque moins d'un départ en retraite sur deux a été compensé par l'ouverture d'un poste à un concours externe.

Le comptage du nombre de chercheurs permanents rattachés à la section est malaisé car il y a des variations entre les données que l'on peut extraire de la base Labintel et les chiffres livrés dans le bilan social et parité du CNRS. Les différences ne sont pas négligeables (de l'ordre de 5 %), et résultent de phénomènes comme les détachements. Les chiffres officiels du bilan social ont l'avantage de permettre de retracer

des évolutions, dans le temps même s'ils sont toujours un peu anciens. Selon cette source, le nombre de chercheurs permanents relevant de la section 40 a fortement décliné, ce qui reflète et même accentue la tendance générale de l'emploi au CNRS. Établi à 215 en 2000, il est passé à 194 en 2013 et il est de 192 en 2017⁽¹¹⁾. Sur une quinzaine d'années la baisse des effectifs est supérieure à 10 % en dépit d'un ralentissement de l'érosion ces dernières années, contre 6 % à l'échelle du CNRS. Dans les deux cas c'est le corps des chargés de recherche qui se rétracte, en raison du faible nombre de postes ouverts aux concours externes dans la section⁽¹²⁾.

Il en résulte un vieillissement de la population des chercheurs, qui se traduit dans une pyramide des âges à la base étroite : en 2016 (source bilan social) la part des chercheurs âgés de moins de 40 ans est de 22 %, contre 40 % pour les chercheurs âgés de 50 ans ou plus, tandis que les quarantennaires représentent 38 % de l'effectif. L'exploitation de la base Labintel en septembre 2019 permet de dresser un état des lieux actualisé des inégalités de genre. Les femmes représentent 47,7 % des 197 chercheurs recensés, et les hommes 52,3 %. Majoritaires dans le corps des CR (53,3 % de femmes), elles sont nettement minoritaires dans le corps des DR (38,9 % de femmes)⁽¹³⁾, où leur part progresse toutefois graduellement (elle était de 32,9 % en 2016). Un tel rééquilibrage est impératif, mais il ne peut qu'être lent compte tenu du faible rythme de recrutement au niveau directeur de recherche : 3 postes étaient ouverts au concours en 2017 et 4 en 2018 et en 2019. Sur ces 11 postes, 3 hommes et 8 femmes ont été promues.

Les tendances démographiques sont préoccupantes, car elles allient vieillissement par raréfaction des recrutements, faible présence des femmes parmi les DR, et blocage des carrières. Le passage DR représente un premier point de blocage, que l'on retrouve aussi dans les étapes suivantes de la carrière (passage DR2-DR1, puis DR1-DRCE). Le passage DR est un concours, pour lequel les candidatures externes sont minoritaires et qui

fonctionne *de facto* comme une étape de promotion pour les chargés de recherche. Le nombre de candidats par postes ouverts s'établit comme suit : 5 en 2017, 7 en 2018, 7 en 2019. De tels ratios sont préoccupants dès lors que le passage DR est une étape normale et attendue dans les déroulements des carrières. Le nombre de postes ouverts est sérieusement déséquilibré par rapport au nombre de candidatures que la section évalue comme pouvant légitimement accéder à une promotion dans le corps des DR : en 2019 par exemple plus de la moitié des 27 dossiers de candidature interne étaient dans ce cas, alors que le nombre de postes était de 4. Un blocage des carrières qui atteint une telle ampleur est anormal et délétère, autant que la raréfaction des recrutements au niveau CR. L'ouverture d'une hors classe pour les CR ne constitue aucunement une réponse adéquate à ce problème. En effet, elle est d'abord conçue comme un rattrapage pour des chercheurs actifs mais qui sont toujours CR alors qu'ils sont avancés en carrière. Et elle est bénéfique à cet égard. Même si elle était mobilisée dans une logique de sas d'attente elle ne serait pas une réponse pertinente, car la file d'attente (le nombre de CR candidats au concours DR) est bien trop longue. Enfin les blocages des carrières se répètent aux passages DR1 et DRCE, où le nombre de dossiers justifiant une promotion excède par trop le nombre de supports : par exemple en 2018 15 postulants DR2 pour 4 postes ouverts à la promotion DR1, et 4 DR1 pour 1 promotion DRCE1.

Les tendances lourdes qui affectent la démographie des corps des personnels IT et chercheurs sont inquiétantes : vieillissement, inégalités de genre, blocage des carrières, etc. La section 40 s'alarme de leurs conséquences sur la pérennité de la recherche relevant de son périmètre, alors que ne cesse de croître le nombre de jeunes chercheurs qui ont un dossier scientifique remarquable et qui sont durablement et durement confinés dans des situations précaires et instables.

ANNEXES

Tableau A : Part des femmes aux différentes étapes des concours chargés de recherche (données de la section).

	2017	2018	2019
Candidatures	49 %	50 %	52 %
Audition	38 %	42 %	59 %
Admissibilité	30 %	38 %	50 %
Admission	60 %	40 %	50 %

Tableau B : Répartition par sexe et corps des IT de la section 40 (source Labintel 20/09/2019).

Corps	Femmes	Hommes	Total	% femmes
Total IR	11	7	17	61,1
Total IE	31	9	40	77,5
Total AI	27	9	36	75,0
Total TC	17	3	20	85,0
Total AT	1	0	1	100,0
Total	87	28	115	75,6

Tableau C : Répartition par sexe et BAP des IT de la section 40 (source Labintel 20/09/2019).

BAP	Femmes	Hommes	Total	% femmes
BAP E	5	5	17	50,0
BAP D	15	8	23	65,2
BAP J	38	11	49	77,6
BAP F	29	3	32	90,6
BAP G	0	1	1	0,0
Total	87	28	115	75,6

Bap E (informatique, statistiques, calcul scientifique) ; Bap D (sciences humaines et sociales) ; Bap J (gestion et pilotage) ; Bap F (culture, communication, production, diffusion des savoirs) ; Bap G (patrimoine immobilier, logistique, restauration, prévention).

Tableau D : Répartition par sexe et grade des chercheurs de la section 40 (source Labintel 20/09/2019).

Grade	Femmes	Hommes	Total	% femmes
CRCN	60	51	111	54,1
CRHC	4	5	9	44,4
DR2	19	27	46	41,3
DR1	9	18	27	33,3
DRCE	2	2	4	50,0
Total CR	64	56	120	53,3
Total DR	30	47	77	39,0
Total	94	103	197	47,7

Notes

- (1) Les sections concernées sont les 33, 34, 35, 36, 37 et 39.
- (2) Jusque 2017 des concours distincts étaient organisés pour les 1^{re} et 2^e classes du corps des chargés de recherche, ce qui permettait de différencier des profils en fonction des expériences antérieures dans les activités de recherche. Depuis 2018, avec la fusion de ces deux classes en une classe normale (CRCN), les deux niveaux de concours sont réunis en un seul.
- (3) Ce ratio est particulièrement défavorable en section 40 puisqu'en 2019 sa valeur est de 22,6 à l'échelle du CNRS. La situation de la section 40 est pratiquement la pire en comparaison avec toutes les sections et CID (une seule section a un ratio supérieur – en l'occurrence d'un point).
- (4) Le tableau A en annexe donne un état de la distribution des candidatures par sexe aux différentes étapes des concours pour ces trois années. À l'échelle du CNRS, la proportion de femmes recrutées en 2019 sur les concours CRCN est de 38%.
- (5) À ces 137 chercheurs affiliés à la section 40 et affectés dans des UMR rattachées à titre principal à la section il faut ajouter 60 autres chercheurs de la section 40 qui sont affectés dans d'autres unités, avec une forte dispersion puisque cela concernait plus de 30 unités (source Labintel, 20 septembre 2019). Enfin, un nombre limité de chercheurs se trouve en situation de détachement.
- (6) Le nombre d'ingénieurs et techniciens du CNRS affectés dans ces 22 UMR est également très dispersé : 9 d'entre elles en comptent 1 ou 2, 7 en comptent 3 à 5, 4 en comptent 6 à 8, et 2 en comptent 10 ou plus.
- (7) Au cours des trois dernières années, le nombre d'UMR comptant au plus 3 chercheurs est passé de 5 à 7, quand celui des UMR comptant 7 chercheurs ou plus est passé de 8 à 10 (source Labintel, 20 septembre 2019).
- (8) Le tableau B figurant en annexe rend compte de la distribution des hommes et femmes dans chaque corps des IT.
- (9) La distribution des âges n'est pas issue de Labintel, mais des données de la base personnel Zento, mars 2018.
- (10) Les métiers de ces agents sont multiples, et leur féminisation est inégale, comme le montre le tableau C figurant en annexe.
- (11) La source Labintel indique 197 chercheurs en septembre 2019, ce qui ne signifie pas que les effectifs ont cru de 5 chercheurs en deux ans. Les écarts résultent de différences dans les sources.
- (12) L'évolution du nombre de ces postes a été retracée plus haut dans ce texte. Bien sûr elle ne tient pas compte de recrutements par des CID de chercheurs qui sont, une fois recrutés, éventuellement rattachés à la section 40.
- (13) Le tableau D livré en annexe croise grade et sexe.

SECTION 41

MATHÉMATIQUES ET INTERACTIONS DES MATHÉMATIQUES

Composition de la section

Didier BRESCH (président de section), Mikael DE LA SALLE (secrétaire scientifique), Grégoire ALLAIRE, Anne-Marie AUBERT, Jonathan BAUR, Isabelle BELLIER, Christian BONATTI, Mireille BOUSQUET-MÉLOU, Frédéric CHAPOTON, François CHARLES, Gilles COURTOIS, Julie DELON, Adrien DUBOULOZ, Nathanaël ENRIQUEZ, Aurélie FISCHER, Olivier FRÉCON, Véronique GAYRARD, Danela Oana IVANOVICI, Christian LEMERDY, Anne PHILIPPE, Jean-Marc SAC-
EPEE.

Résumé

La section 41, dédiée aux mathématiques et à leurs interactions, est l'unique section de son Institut, l'INSMI. La qualité de l'école mathématique française est reconnue au niveau international avec une interaction de plus en plus féconde entre différents domaines des mathématiques entre eux ou avec d'autres domaines de recherche. L'articulation entre les disciplines mathématiques, rendue possible grâce aux actions de l'INSMI, qu'elles soient en sciences fondamentales ou en sciences plus appliquées permet cette richesse et cette aptitude à dépasser les frontières. Plus que jamais, les mathématiques jouent un rôle essentiel dans la modélisation et l'analyse des systèmes complexes.

I. Introduction

Un des rôles du mathématicien ou de la mathématicienne est d'observer le monde et d'essayer de créer des outils conceptuels permettant de le comprendre un peu mieux. Toute la puissance des mathématiques réside dans ce double jeu : tantôt elles formalisent des problèmes concrets, ce qui permet – parfois – de les résoudre, tantôt elles explorent les conséquences de ce formalisme, jusqu'à développer des concepts très abstraits et généraux, *a priori* déconnectés du réel, mais qui – parfois – ont des retombées concrètes et inattendues. Des théories les plus abstraites aux analyses de méthodes les plus concrètes, il n'y a pas une mathématique mais plusieurs ! Et elles sont

toutes essentielles et entremêlées. On a entendu beaucoup de choses sur la rigueur de la discipline mais peu de gens savent que le mathématicien et la mathématicienne sont, en même temps, élastiques, ouverts et créatifs ! En effet, ils-elles étendent et déforment chacun de leurs objets et ils-elles s'enrichissent des liens, tissés entre différents chercheur.e.s en mathématiques ou dans d'autres disciplines (en France et à l'international). Des liens qui leur permettent de résoudre de nouveaux problèmes mathématiques en interne ou tournés vers d'autres disciplines ou d'autres champs d'applications. Néanmoins, vouloir restreindre les mathématiques à une activité de service reviendrait à les faire disparaître. À l'opposé, ne privilégier que l'axiomatisation, l'étude des structures et la dynamique interne de la discipline conduirait à réduire l'enrichissement des mathématiques elles-mêmes.

Avoir une articulation unique sans frontière entre les mathématiques est une richesse indéniable de la seule section 41 du comité national de la recherche scientifique (CoNRS) en étroite collaboration avec l'INSMI (Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions). Cela lui permet d'être un lien unique entre les différentes sociétés savantes SFdS (Société de Statistiques), SMF (Société de Mathématiques Française), SMAI (Société Mathématiques Appliquées) et les 2 Comités Nationaux Universitaires (CNU25 et CNU26). Sur ces 4 années de mandat, la section 41 a mis l'excellence scientifique comme premier critère tout en tendant à refléter au maximum sur ses propositions de recrutement tout le spectre des mathématiques. Le concours CRCN s'organise autour d'un concours général, d'un concours avec des postes en interaction avec d'autres disciplines et de concours liés à des postes croisés avec d'autres Instituts du CNRS. Cet éventail pluri-formes est important pour assurer cette diversité. Le concours DR2 concerne chaque année plusieurs postes en essayant de balayer au maximum le spectre des mathématiques sur un mandat du comité national.

L'excellence Française en recherche autour des mathématiques n'est plus à démontrer. On

peut encore la mesurer ces quatre dernières années au regard des multiples conférences invitées plénières ou dans les panels de congrès internationaux phares comme l'ICM2018, l'ICIAM2019, l'ICMP2018 ou dans d'autres grosses conférences internationales plus spécialisées. Le nombre de prix internationaux est également pléthorique avec par exemple sur ces quatre dernières années : A. Figalli (Médaille Fields 2018), Y. Meyer (Prix Abel 2017), C. Voisin (Prix Shaw 2017, Prix l'Oréal-Unesco 2019), C. Bardos (Prix ICIAM Maxwell 2019), Y. Maday (Prix ICIAM Pioneer 2019), S. Gouëzel (Prix Michael Brin 2019), M. Talagrand (Prix Shaw 2019), J.F. Le Gall (Prix Wolf 2019), V. Lafforgue (Prix Breakthrough 2019), J.-M. Coron (Prix W. T. et Idalia Reid 2017)...

II. Exemples de progrès récents en mathématiques

Nous essaierons de donner dans cette section quelques idées de productions mathématiques et d'enjeux importants en mathématiques. Il est bien évidemment impossible de prétendre à l'exhaustivité mais nous espérons par ces choix montrer la richesse et la diversité en couvrant un large spectre thématique.

A. Géométrie algébrique et théorie des nombres

En mars 2018, le mathématicien canadien Robert P. Langlands a reçu le prix Abel pour ses travaux et son programme, initié en 1967 : un vaste tissu de conjectures qui jette des ponts entre de nombreux champs de recherche, notamment la théorie des représentations des groupes réductifs et la théorie des nombres.

Le programme de Langlands se décline aujourd'hui dans plusieurs versions qui posent des questions différentes. Le cas des groupes réductifs p -adiques classiques a été démontré par Arthur et complété par un travail monumental de Mœglin-Waldspurger. Le cas des coefficients de caractéristique positive a connu de nombreux développements. La correspondance de Langlands géométrique relie le programme initial à la géométrie algébrique, la théorie des faisceaux pervers, des espaces de modules et des systèmes intégrables. Yun et Zhang ont récemment prouvé une généralisation des formules obtenues par Gross-Zagier, pour des dérivées supérieures de certaines fonctions L pour le groupe PGL_2 sur un corps de fonctions. Ils ont en particulier construit des fonctions L globales ayant des ordres d'annulation impairs.

Les travaux révolutionnaires de Scholze (Médaille Fields en 2018) qui l'ont conduit à définir les espaces perfectoides en 2012, ont diffusé largement au-delà des premières applications à la théorie de Hodge p -adique. Il a repris et donné une vitalité renouvelée à plusieurs thèmes de topologie algébrique qui sont maintenant intégrés au vocabulaire de nombreux théoriciens des nombres. La théorie des catégories supérieures et la géométrie algébrique dérivée font partie des outils communs à de nouvelles générations. L'apparition de ces concepts ne se limite pas à la théorie des nombres, ils sont fondamentaux pour de larges pans de la géométrie algébriques comme la géométrie énumérative, la théorie géométrique des représentations...

Par ailleurs, les méthodes perfectoides ont permis à André et Bhatt de réaliser des progrès spectaculaires sur d'anciennes questions d'algèbre commutative qui apparaissaient bloquées, résolvant ainsi un écheveau de conjectures d'Hochster formulées dans les années 1960.

Un autre rapprochement spectaculaire entre thématiques est celui de l' o -minimalité et de la géométrie algébrique et arithmétique. La notion de langage o -minimal, introduite en

théorie des modèles il y a plusieurs années, est un élément décisif de la preuve de la conjecture d'André-Oort. De manière surprenante, la théorie des modèles permet d'exprimer une propriété profonde de la fonction exponentielle usuelle avec des conséquences arithmétiques remarquables. Ces techniques o -minimales ouvrent également de nouvelles perspectives sur des questions classiques de géométrie algébrique complexe et de théorie de Hodge, et ont permis la résolution d'une conjecture d'algébricité de Griffiths.

Les dernières années ont vu d'importants progrès sur la question – très ancienne – de la rationalité des variétés algébriques, combinant des approches très différentes. Claire Voisin (Médaille d'or du CNRS 2016) a importé dans le sujet une méthode de la théorie des cycles algébriques, la décomposition de la diagonale, qui a permis à elle et à de nombreux mathématiciens d'établir l'irrationalité de familles de variétés algébriques. Par ailleurs, le progrès constant dans le programme du modèle minimal a permis des percées importantes dans la compréhension de la géométrie de familles spéciales de variétés – valant en particulier la médaille Fields à Birkar pour sa preuve de la finitude des familles de variétés de Fano de dimension fixée. Ce travail a permis en particulier de mieux comprendre les transformations des variétés rationnelles.

L'avancée du programme du modèle minimal va de pair avec l'élaboration d'une version analytique complexe de ce programme qui en réalise certains aspects du point de vue de l'étude du flot de Ricci sur les variétés kähleriennes. Ce sujet se situe à la frontière de l'analyse sur les variétés, de la géométrie métrique, de la théorie du pluripotential et de la géométrie algébrique. Les progrès récents sur des questions d'hyperbolicité des hypersurfaces algébriques illustrent de manière semblable la convergence et la complémentarité des méthodes analytiques et algébriques. Il faudra veiller à ce que ce sujet en pleine expansion continue à être représenté au plus haut niveau en France.

B. Théorie des représentations et algèbre

La théorie des algèbres amassées, introduite par Fomin et Zelevinsky vers l'an 2000 en relation avec les bases canoniques des groupes quantiques, a eu un impact majeur en théorie des représentations mais aussi dans des domaines plus géométriques comme la théorie de Teichmüller supérieure. Elle continue de susciter des développements nouveaux : l'introduction récente par Gross, Hacking, Keel et Kontsevich de la notion de « diagramme de diffusion » a permis de démontrer en toute généralité une conjecture centrale du domaine. Il est assez remarquable que ce progrès soit venu d'une direction très géométrique, en relation avec la symétrie miroir et les variétés de log-Calabi-Yau.

Dans une autre direction, une activité importante concerne les représentations des groupes algébriques réductifs en caractéristique positive p . Une célèbre conjecture de Lusztig proposait une description des modules simples lorsque p n'est pas trop petit, qui ne vaut en fait que pour p très grand. On peut espérer des progrès majeurs dans les années à venir, sur des questions notoirement difficiles.

De manière générale, l'idée de catégorification continue de jouer un rôle central dans de nombreux travaux récents en algèbre et aux interfaces avec d'autres domaines. Outre la catégorification des algèbres amassées déjà évoquée, on peut notamment citer les théories homologiques des noeuds, où se rencontrent un point de vue provenant des représentations des groupes quantiques, éventuellement sous forme combinatoire, et des constructions beaucoup plus géométriques, en particulier symplectiques.

Dans une direction plus algébrique, une connexion nouvelle et déjà fructueuse est apparue entre d'une part la théorie de Hairer sur les structures de régularité pour les équations différentielles stochastiques et certaines algèbres de Hopf ou opérades, proches des structures apparues auparavant en relation

avec les travaux de Connes et Kreimer sur la renormalisation des théories des champs, ou encore en analyse numérique.

Dans le domaine de la combinatoire algébrique, un important progrès structurel dans la théorie des matroïdes a été accompli par Adiprasito, Huh et Katz, qui ont montré le théorème de Lefschetz difficile et les relations de Hodge-Riemann pour un anneau commutatif associé à un matroïde arbitraire. Comme pour les travaux précédents de Elias et Williamson sur la catégorification des algèbres de Hecke, il s'agit d'étendre, bien au delà de la géométrie algébrique, les propriétés structurelles profondes de l'anneau de cohomologie d'une variété algébrique projective.

Au niveau des fondations, un problème historique de la théorie des ensembles a été résolu ces dernières années : il concerne l'égalité de deux cardinaux p et t . Contre toute attente, Malliaris et Shelah ont démontré que les axiomes ZFC de la théorie des ensembles impliquent l'égalité $p = t$. Leur démonstration, basée sur l'utilisation de la topologie générale en théorie des modèles, résout en même temps un autre problème portant sur l'ordre de Keisler.

Notons que la théorie des modèles, une partie de la logique mathématique, a depuis une trentaine d'années de nombreuses interactions avec le reste des mathématiques : à titre d'exemples, la théorie des modèles des corps valués a eu des applications majeures en intégration motivique et aux espaces de Berkovich. Certains liens entre l'o-minimalité et la géométrie algébrique ont été évoqués à la section précédente.

C. Géométrie

Nous présenterons dans cette partie un choix très arbitraire n'incluant pas de nombreux autres résultats très importants dans le domaine, dont la résolution en 2018 d'une conjecture de Yau par Marquez, Neves, Irie et Song sur l'existence d'une infinité d'hyper-surfaces minimales plongés dans

toute variété riemannienne compacte de dimension comprise entre 3 et 7, la résolution en 2016 de la conjecture de Zimmer par Brown, Fisher et Hurtado pour les réseaux co-compacts, ou les progrès récents sur les représentations d'Anosov et la théorie de Teichmüller en dimension supérieure avec les travaux de Kassel, Guéritaud, Guichard, Kobayashi, et Wienhard.

1. Flot de Ricci et Topologie

Le flot de Ricci introduit par Hamilton en 1980 est un flot sur l'espace des métriques « optimale ». C'est un outil puissant, permettant d'établir un lien entre des questions de nature topologique et géométriques. Il a été à l'origine de nombreux résultats spectaculaires ces dernières années comme la résolution par Perelman, en 2002, des conjectures de Poincaré et de géométrisation de Thurston. Après ce tour de force, on pouvait s'attendre à d'autres applications. Récemment, Bamler et Kleiner ont illustré encore la force de cette approche en montrant la conjecture de Smale généralisée portant sur la topologie des variétés de dimension 3 : « sur une 3-variété compacte X de courbure constante égale à $+1$ ou -1 , l'inclusion du groupe des isométries dans le groupe des difféomorphismes de X est une équivalence d'homotopie », ce qui équivaut à ce que l'ensemble des métriques à courbure constante sur X soit contractile, propriété que Bamler et Kleiner ont établie en montrant une forme d'unicité du flot de Ricci « traversant les singularités ».

2. Espaces localement symétriques et théories des nombres

Le mathématicien Venkatesh (Médaille Fields 2018) a établi des liens entre différents domaines des mathématiques, « fonctions L » et géométrie hyperbolique, formes automorphes et dynamique et plus récemment entre cohomologie des réseaux arithmétiques et théorie Langlands. Par exemple, Bergeron, Sengün et Venkatesh ont formulé une conjecture stipu-

lant que l'homologie de degré 2 des variétés hyperboliques arithmétiques de dimension 3 est engendrée par des surfaces de petit genre (contrôlé par le volume de la variété hyperbolique) ; ils établissent cette conjecture pour certaines familles variétés arithmétiques. Cette conjecture entretient des liens profonds avec la croissance de l'homologie de torsion des suites de revêtements finis d'une variété arithmétique : si la conjecture est vraie, le taux de croissance exponentielle du cardinal de l'homologie de torsion de degré 1 par rapport au volume du revêtement est égal à $1/6\pi$.

3. Géométrie synthétique et analyse

La propriété CAT(k) est une version pour les espaces métriques de la notion, « courbure sectionnelle majorée », classique pour les variétés riemanniennes. De même, pour les espaces métriques mesurés, des versions provenant de la théorie du « transport optimal » de la notion « courbure de Ricci minorée » ont été introduites par Sturm, Lott-Villani. Un exemple typique d'espace métrique mesuré où cette notion s'applique est constitué des limites au sens de Gromov-Hausdorff des suites de variétés riemanniennes à courbure de Ricci minorée mais il y en a bien d'autres. Cela ouvre tout un champ de recherche dans ce cadre. Par exemple, Mondino et Cavalletti ont montré en 2018 une inégalité isopérimétrique « presque euclidienne » dans ce cadre qui étend aux variétés riemanniennes à courbure de Ricci minorée. L'existence d'une notion synthétique de courbure scalaire majorée pour les espaces métriques est largement ouverte.

D. Systèmes dynamiques

En systèmes dynamiques la dernière décade voit le renouveau de la thématique « action de groupes en basse dimension » en particulier action de groupes discrets sur le cercle. Un exemple typique classique d'une telle action est l'action projective d'un groupe

de surface sur le cercle. Ce renouveau passe par une grande variété d'approches, approfondissant en particulier les liens avec la géométrie des groupes. On peut citer Katrin Mann pour ses travaux sur les composantes connexes des représentations des groupes de surfaces dans les homéomorphismes du cercles. Dans un tout autre esprit on peut citer le travail de Kim et Koberda qui montrent (version « faible » de leur résultat) que pour tout réel $a > 1$ il existe des groupes finiment engendrés admettant des actions sur le cercle qui sont de classe C^a mais qui n'en admettent aucune qui soit de classe C^b pour tout b supérieur à a . Ce renouveau amène de nouvelles réflexions sur la notion de moyennabilité des groupes (Le Boudec Matte Bon) et sur les groupes ordonnables, en particulier avec de nouvelles approches de l'étude des groupes de type Thompson (citons Hyde-Lodha).

Un lien plus étonnant se dessine avec l'étude des mapping class groups des surfaces de type infini (par exemple, les travaux de Bavard, ou de Calegari) à travers l'action sur des graphes hyperboliques au sens de Gromov.

En dynamique holomorphe on voit des avancées importantes en dimension > 1 . Ce domaine, jusque là entièrement dominé par l'approche de la géométrie complexe (pluripotentiel, courants) intègre de plus en plus d'outils et d'approches issues de la dynamique différentiable réelle : cela a permis à Dujardin (2017), Biebler ou Taflin de construire et de comprendre des ouverts dans l'espace des paramètres où la dynamique est robustement instable.

En dynamique réelle, on connaît depuis les années 60 (Abraham-Smale ou Newhouse) de tels ouverts dans l'espace des difféomorphismes, où tout difféomorphisme est instable : pour contourner cette difficulté, Palis a proposé dans les années 2000 une conjecture où les dynamiques « typiques » (au sens de Kolmogorov) seraient décrites à l'aide d'un nombre fini de mesures d'équilibres attractantes. Cette conjecture a été en grande partie mise à mal par les travaux de Berger : il montre que la coexistence, pour un même système dyna-

mique, d'une infinité d'orbites périodiques attractantes peut-être « typique », au sens de Kolmogorov.

E. Analyse

L'étude des opérateurs d'intégrales singulières, qui est une partie centrale de l'analyse harmonique, a connu des avancées de premier ordre. D'une part, sur les intégrales à plusieurs paramètres, avec notamment des caractérisations des commutateurs itérés relatifs à des opérateurs de Journé ou à des opérateurs de Calderon-Zygmund à plusieurs paramètres. D'autre part, sur les inégalités à poids dans de nouveaux cadres (poids multivariés, poids matriciels, etc.). Ces avancées dessinent une tendance forte de l'analyse harmonique à se développer dans un cadre dans lequel l'analyse de Fourier n'est plus incontournable. La théorie du potentiel et l'analyse géométrique ont connu de grandes avancées grâce aux travaux récents de Logunov-Malinnikova. Grâce à des arguments combinatoires particulièrement novateurs, ceux-ci ont fait évoluer de manière spectaculaire l'étude des ensembles nodaux des fonctions propres d'équations elliptiques (conjectures de Nadirashvili et Yau). Parmi les conséquences spectaculaires : la mesure de Hausdorff d'une fonction harmonique non constante sur \mathbb{R}^3 est infinie.

La théorie des algèbres d'opérateurs et plus généralement toute l'analyse non commutative interagit avec la théorie des groupes, ceux-ci fournissant des exemples naturels d'objets d'étude. Les résultats spectaculaires de Tikuisis-White-Winter sur la classification des C^* -algèbres nucléaires (programme d'Elliott) sont venus illustrer ce point. Mentionnons aussi les résultats importants sur la simplicité des C^* -algèbres de groupes. Le programme de Ribe, qui vise à caractériser les propriétés locales des espaces de Banach par des propriétés des structures uniformes des espaces métriques, a connu des avancées spectaculaires. Ces avancées génèrent des applications inattendues de la géométrie des espaces de Banach à différents

domaines : géométrie, théorie des graphes, informatique théorique. Citons également la résolution du problème de Kadison-Singer, un problème d'algèbre d'opérateurs issu dans les années 50 des fondements de la mécanique quantique et démontré par une équipe d'informaticiens théoriciens avec des méthodes de mathématiques discrètes.

F. Équations aux dérivées partielles

L'école française est particulièrement active et reconnue dans ce domaine comme en témoigne le nombre d'invités à l'ICM2018, à l'ICIAM2019 ainsi qu'à l'ICMP2018. Établir des ponts entre plusieurs grandes familles des équations aux dérivées partielles et aussi avec d'autres branches des mathématiques engendre souvent de réelles percées mathématiques et nous avons pu assister à un nombre impressionnant de résultats en ce sens.

Citons par exemple les travaux sur la régularité paraboliques pour les équations cinétiques (équations de Landau et de Boltzmann) exploitant des techniques de régularité elliptiques et paraboliques introduites par De Giorgi, Nash et Moser, puis développées par DiBenedetto, Caffarelli etc. avec au centre la preuve d'une inégalité de type Harnack pour la solution couplée à des techniques d'hypoellipticité introduites par exemple par Kolmogorov ou Hörmander.

En ce qui concerne les EDPs pour la mécanique des fluides, un grand nombre de résultats importants ont été obtenus autour de phénomènes de surface libre, d'équations dispersives, de modèles mixtes incompressibles-compressibles, de perturbations singulières... Nous ne citerons ici que deux exemples parus chacun dans *Annals of Maths* concernant les solutions faibles à la Leray : Un résultat récent montre que les solutions faibles de Navier-Stokes incompressibles ne sont pas uniques dans la classe des solutions faibles à énergie

cinétique finie pour des données initiales d'énergie cinétique finie. Une nouvelle méthode d'estimations quantitatives de régularité très faible pour les équations de continuité est introduite et a déjà permis d'apporter une réponse à deux problèmes ouverts sur les équations de Navier-Stokes compressibles étendant ainsi considérablement les résultats de P.-L. Lions et E. Feireisl *et al.*

Quantifier une perte de symétrie dans les systèmes d'équations aux dérivées partielles est important pour mieux décrire des phénomènes comme la transition de phase, l'instabilité, l'auto-organisation, par exemple. Récemment un travail a permis de caractériser complètement la région optimale de brisure de symétrie dans les inégalités de Caffarelli-Kohn-Nirenberg critiques, par une nouvelle méthode basée sur des fonctionnelles d'entropie et l'évolution sous l'action du flot associé à une diffusion non linéaire.

L'analyse des systèmes de particules est à la croisée des chemins de différentes branches des mathématiques (analyse, équations aux dérivées partielles, probabilités, théorie des nombres, géométrie). Les systèmes à grand nombre de particules exhibent un comportement macroscopique qui peut être compris grâce à la théorie des champs moyens. Le comportement microscopique est lui obtenu comme fluctuation autour de la limite de champ moyen. Plusieurs avancées remarquables ont été obtenues sur ce sujet ces quatre dernières années et nous n'en citerons que quelques-unes : la limite champ moyen pour les gaz de Coulomb, la convergence et son estimations quantitative de la méthode vortex vers Navier-Stokes, la convergence et son estimation quantitative pour des noyaux attractifs du type Patlak-Keller-Segel, la convergence de systèmes de particules satisfaisant les lois de Newton avec collision élastique vers les équations de Boltzmann ou le fait de montrer que le mouvement brownien peut être obtenu comme la trajectoire limite d'une particule marquée dans un système déterministe de sphères dures avec un choix d'échelles de temps et d'espace convenables.

G. Probabilités

La théorie de la gravité quantique de Liouville, née en physique théorique dans les années 1980, est aujourd'hui au centre d'une grande activité en probabilités. Il s'agit d'une géométrie naturellement associée à une mesure aléatoire très irrégulière – typiquement l'exponentielle du champ libre gaussien – sur une surface de Riemann. Différentes approches de régularisation ont été développées pour définir la mesure associée : l'une basée sur le chaos multiplicatif gaussien et l'autre associée à la théorie conforme des champs dite de Liouville. Il est désormais établi que les deux approches coïncident sur la sphère de Riemann. Cette théorie a connu très récemment de nombreuses avancées mathématiques : justification des formules physiques de Knizhnik-Polyakov-Zamolodchikov, dites KPZ, relation fondamentale entre gravité quantique de Liouville et évolution de Schramm-Loewner (Sheffield (2016), Duplantier, Miller, Sheffield (2019) ou encore des formules dites DOZZ (Kupiainen, Rhodes, Vargas 2019). Des avancées particulièrement remarquables portent sur la conjecture reliant la gravité quantique de Liouville aux limites d'échelle des cartes planaires aléatoires, éventuellement pondérées par des modèles de physique statistique. Notamment, une série de travaux récents (Miller, Sheffield 2019) montrent que la gravité quantique de Liouville de paramètre $\sqrt{8/3}$ peut être munie d'une métrique qui la rend équivalente à l'espace métrique de la carte brownienne, limite en loi universelle des cartes aléatoires uniformes (Le Gall 2013, Miermont 2013). Cette équivalence se généralise au cas de cartes portant un modèle d'amas aléatoires dit de Fortuin-Kasteleyn (FK).

L'étude des modèles critiques sur réseaux a connu une avancée importante sur la transition de phase du modèle de FK – un modèle unifiant divers modèles de physique statistique en dimension 2, dont la percolation. Une nouvelle méthode de preuve utilisant une généralisation de l'inégalité dite OSSS sur des arbres de décision, se révèle incroyablement efficace pour

montrer que la transition de phase est abrupte. Elle permet de traiter le cadre général de graphes transitifs, là où les résultats qui existaient n'étaient prouvés que pour des réseaux planaires très particuliers (Duminil-Copin, Raoufi, Tassion 2019). On peut voir là un développement d'une interaction fructueuse entre informatique théorique et mécanique statistique. Enfin une nouvelle interprétation des fonctions de corrélation de bord du modèle d'Ising critique à interaction à courte portée est donnée via la représentation dite en « random currents » (Aizenman, Duminil-Copin, Tassion, Warzel 2019). Cela éclaire le caractère universellement pfaffien de ces corrélations et l'émergence de structures fermioniques au-delà des cas résolubles.

H. Statistiques et imagerie

1. Statistique

La statistique est en plein essor, et occupe une place essentielle dans le paysage mathématique actuel. La situation présente de la discipline se caractérise par un accès inédit à des bases de données ouvertes relatives à tous les domaines. En parallèle, l'augmentation des capacités de calcul suscite un intérêt renouvelé pour l'étude théorique de différents algorithmes et offre des possibilités pour en développer d'autres. La communauté a su prendre le tournant des grands défis de l'apprentissage et de l'intelligence artificielle et joue pleinement son rôle, aux côtés d'une branche de l'informatique, dans l'exploration de ces thèmes nouveaux. Point très positif, ces sujets issus de la statistique moderne sont extrêmement attractifs pour d'excellents étudiants. Des avancées théoriques significatives ont eu lieu notamment sur le thème des forêts aléatoires, de la statistique computationnelle ou encore de la sélection de modèle. La diversité des applications et des interactions avec les autres disciplines et dans l'industrie a explosé ces dernières années. Les apports de travaux en statistique dans différents champs d'applica-

tion sont nombreux, et généralement les collègues des autres disciplines identifient mieux leurs besoins en statistique. Les interactions sont toujours très fortes en biologie, notamment en génomique, dans le domaine de la santé, en particulier en neurosciences, et en économie, mais elles se développent également dans le domaine de l'environnement, du marketing, de la justice, du sport, en sciences sociales, notamment en psychologie, archéologie, linguistique... Les collaborations sur ces sujets motivent l'introduction de nouvelles procédures et de développements mathématiques originaux, sans pour autant occulter les méthodes classiques, qui dans certains cas se révèlent efficaces avec une appréciable interprétabilité. Les liens avec les autres branches des mathématiques se développent de plus en plus, notamment autour de l'analyse topologique des données, nouveau sujet ayant émergé depuis quelques années à partir de travaux en topologie algébrique appliquée et géométrie algorithmique. Étant donné des observations qui se présentent sous la forme de nuages de points dans un espace euclidien ou plus général, la topologie et la géométrie permettent d'extraire de l'information pertinente sur la structure de ces données en fournissant des approches efficaces en inférence robuste, en particulier grâce à la notion de distance à la mesure, version robuste au bruit de la distance à un ensemble compact. L'étude des aspects géométriques dans les données comprend de nombreuses directions de recherche, qui soulèvent des problèmes difficiles faisant appel à l'ensemble du champ des mathématiques.

2. Imagerie

Les enjeux et les défis des mathématiques liés au domaine de l'imagerie numérique sont de plusieurs types. D'une part, il est nécessaire de développer un cadre théorique pour traiter et analyser les images. D'autre part, l'imagerie est étroitement liée aux applications et au développement d'algorithmes efficaces. Dans le domaine des problèmes inverses en imagerie, de nombreux progrès ont été possibles ces der-

nières années grâce aux avancées en optimisation (convexe ou non convexe, lisse ou non lisse) et en échantillonnage comprimé. Parallèlement, les progrès très récents en échantillonnage bayésien permettent de quantifier l'incertitude des résultats de ces approches d'optimisation. Toujours dans le domaine des problèmes inverses, les approches dites de co-conception connaissent un essor important : ces approches consistent à modéliser et à optimiser simultanément les paramètres des instruments de mesure et les traitements numériques qui seront appliqués aux données.

3. Enjeux communs

Une tendance très forte de ces dernières années réside dans l'importance croissante de l'apprentissage statistique profond dans ces domaines. Ces approches ont permis des progrès particulièrement impressionnants, d'abord en vision par ordinateur, puis en restauration d'images, mais également dans la création de modèles génératifs d'images, même si ce dernier domaine reste par ailleurs toujours très lié à la géométrie aléatoire. Les aspects théoriques des modèles par réseaux de neurones suscitent un intérêt grandissant dans la communauté mathématique. Les questions qui surgissent sont variées et posent un vrai défi : garanties de convergence, capacité de généralisation, etc. Citons également les récents progrès en transport optimal, notamment algorithmiques, qui expliquent le succès des métriques de Wasserstein dans de nombreux domaines comme les GAN (réseaux génératifs adversaires), l'adaptation de domaine, le metric learning et la classification multi-labels. Enfin, dans un contexte de concurrence internationale et dans un monde où les entreprises privées liées à l'intelligence artificielle sont extrêmement actives pour attirer les meilleurs chercheurs du monde académique, un enjeu scientifique majeur est de garder une recherche publique forte dans ces domaines, non seulement pour en comprendre les propriétés fondamentales et les limitations, mais aussi pour en garantir une utilisation raisonnée et éthique.

I. Optimisation

L'optimisation est un domaine très riche qui interagit avec l'ensemble des mathématiques et qui est utilisé dans de très nombreuses applications. Ses liens avec le calcul des variations, le contrôle, le traitement d'image, les problèmes inverses et la théorie des jeux sont anciens et toujours très actifs. C'est devenu un outil indispensable en apprentissage et traitement des données, grâce à de nouveaux algorithmes prenant en compte une contrainte de parcimonie qui permettent de caler des données avec un minimum de paramètres explicatifs. Les algorithmes d'optimisation ont aussi évolués pour s'adapter aux très grandes dimensions que l'on rencontre, soit en traitement des données massives, soit en optimisation de systèmes modélisés par des équations aux dérivées partielles. Les applications de ces techniques d'optimisation vont de l'assimilation de données pour les modèles météorologique ou climatologiques, à l'optimisation topologique de structures mécaniques construites par des imprimantes 3-d. La prise en compte d'incertitudes, modélisées par des variables aléatoires, a entraîné le développement de nouveaux algorithmes d'optimisation. Cela permet d'obtenir des optima plus robustes ce qui est, par exemple, nécessaire dans les prévisions de production d'énergie pour tenir compte des sources intermittentes (comme l'éolien ou le solaire) ainsi que des aléas climatiques. Les avancées théoriques récentes en transport optimal ont permis l'émergence de nouveaux algorithmes d'optimisation, utilisant par exemple la distance de Wasserstein, afin de mitiger la non-convexité de certains problèmes inverses durs, comme en imagerie sismique.

J. Calcul scientifique

Le calcul scientifique et l'analyse numérique forment un immense champ à l'intersection des mathématiques, de l'informatique et de toutes les disciplines, scientifiques ou

technologiques, qui ont recours à la simulation sur ordinateurs. Les progrès récents de ces dernières années nécessitent de repenser bon nombre d'algorithmes. En effet, la croissance du nombre de coeurs de calcul, l'apparition de processeurs spécialisés (par exemple graphiques) font que la performance n'est plus limitée par la vitesse d'exécution des opérations mais par celle des échanges de données entre les coeurs de calcul. De nouveaux algorithmes apparaissent comme, par exemple, les préconditionneurs multi-niveaux en décomposition de domaines. Un autre moteur de développement est la volonté de simuler des systèmes couplés, mélangeant plusieurs physiques ou plusieurs échelles. Cela génère l'apparition de nouvelles méthodes numériques aux propriétés hybrides s'adaptant ainsi à plusieurs modèles mathématiques. On pense ainsi aux schémas numériques, adaptés à des maillages très généraux, qui ressemblent à la fois à des méthodes d'éléments finis et de volumes finis : par exemple, les méthodes de Galerkin discontinu d'ordre élevé, la méthode des éléments virtuels, les schémas mimétiques et leurs nombreuses variantes. Ces calculs couplés font souvent appel à des schémas itératifs et des progrès importants ont été réalisés dans l'adaptation automatique du niveau de convergence suffisant dans un enchaînement de boucles d'itérations, ce qui permet des gains importants en temps de calcul. Dans le même esprit de rendre abordable des calculs extrêmement complexes, des contributions importantes ont été apportées à la création de modèles ou de bases réduites, ouvrant des perspectives intéressantes sur l'apprentissage, la condensation de données ou la notion de jumeau numérique qui se développe fortement en ingénierie.

III. Articulation CNRS et monde universitaire

Assurer un flux régulier et aussi grand que possible de jeunes chercheur.e.s et Maîtres et

Maîtresses de conférences en mathématiques (section 25 et section 26) sur tout le spectre des mathématiques est vital pour continuer à perpétuer l'excellence de l'école Française et à faire face aux nombreux défis scientifiques et sociétaux qui se dressent devant nous.

La situation en terme de proposition d'emplois permanents dans les universités Française en mathématiques (section 25 et section 26) est particulièrement alarmante et le transfert de connaissances, l'innovation scientifique et la place de la France sur l'échiquier international en grand danger. Heureusement, le CNRS par le biais de l'INSMI a préservé le nombre d'emplois et de promotions au sein de la section 41 ce qui a permis de retarder un étouffement complet du système. La section 41 s'inquiète de la situation du nombre de postes et des promotions dans le monde universitaire qui pourrait engendrer un trou générationnel en recherche mais également en enseignement. En effet il s'agit là d'une situation très préoccupante au regard des besoins de plus en plus croissants en formation mathématique, notamment en ce qui concerne l'IA et la science des données qui attirent de plus en plus d'étudiant.e.s et d'ingénieur.e.s.

En terme de recrutement, le mandat actuel de la section 41 qui s'étend sur plusieurs années lui permet d'avoir une vision globale de l'évaluation des dossiers sur la durée d'exercice, mettant l'excellence scientifique comme premier critère, et tendant à refléter au maximum le spectre des mathématiques. Ceci a permis de couvrir un large éventail des mathématiques avec des recrutements excellents de candidat.e.s issu.e.s du système Français et de l'étranger. La force des mathématiques au CNRS réside dans la concertation et l'échange continu entre la section 41, l'Insmi et les DU comme cela a été confirmé lors d'une réunion tri-partite en juillet 2018. Cette spécificité, qu'il faut préserver, coûte que coûte, assure un travail en profondeur au service de l'excellence des mathématiques françaises dans toute sa diversité du fondamental à l'appliqué.

IV. Synthèse et analyses transversales

A. Thématiques inter-sections et inter-disciplines

La section 41 du CoNRS gère chaque année quelques postes fléchés mathématiques et interactions avec d'autres disciplines et assez régulièrement un poste croisé avec d'autres instituts. Sur ces 3 dernières années les recrutements ont été sur des thèmes en lien par exemple avec l'INS2I, l'INSU, l'INSB, L'INP, l'INEE, l'INSHS. Ce type de postes s'articule très bien avec les postes du concours général permettant ainsi de balayer le spectre large des mathématiques. Donnons ci-dessous deux exemples d'interactions fortes des mathématiques avec d'autres disciplines sachant que d'autres interactions ont été décrites dans la troisième partie.

1. Mathématiques et planète terre

Les mathématiques sont une discipline fondamentale qui est au coeur d'enjeux importants liés à la complexité de la Terre, et plus particulièrement à l'environnement. Appréhender tant des problèmes de recherche que des problèmes de gestion durable sur ce sujet requiert l'adaptation de techniques mathématiques en interaction avec d'autres disciplines qui ont des liens notamment avec les fluides, le vivant et l'humain. A l'inverse, les questions environnementales peuvent également permettre le développement de nouvelles théories mathématiques qui, à leur tour, peuvent apporter une meilleure compréhension de la complexité des phénomènes étudiés pour une aide à la décision. Suite à une recommandation du CSI, l'INSMI soutient la création d'un institut mathématiques de la planète terre, structure sans mur, animé par la fédération de recherche

de la région Auvergne-Rhône-Alpes. A. Guillin a été nommé chargé de mission au sein de l'INSMI pour la mise en place de cette outil collectif. Les objectifs sont -1- la création et animation d'un portail web permettant de mettre en relation des mathématiciens avec des chercheurs d'autres disciplines -2- structurer la recherche dans le domaine mathématique de la planète terre -3- promouvoir le transfert de connaissances et méthodes entre disciplines -4- financer des équipes de recherche pluridisciplinaire sur une problématique donnée relevant des thèmes math. planète terre. Cette thématique touche bien évidemment plusieurs instituts du CNRS autre que l'INSMI comme l'INSU, l'INP, l'INB, l'INEE, l'INS2I, l'INSHS par exemple. On peut citer des collaborations déjà existantes sur la sélection naturelle et évolution des écosystèmes entre chercheur.e.s de l'INEE et de l'INSMI, sur les ondes internes entre chercheur.e.s de l'INP et de l'INSMI, sur les interactions surface libre et objets flottants entre chercheur.e.s de l'INSU et l'INSMI, sur l'évolution des méthodologies utilisées en sciences de la Terre pour l'imagerie du sous-sol entre chercheur.e.s de l'INSU et de l'INSMI, sur les écoulements granulaires secs ou humides entre chercheur.e.s de l'INSU et de l'INSMI.

2. Mathématiques et mécanique

L'interaction entre mathématiques et mécanique est ancienne mais toujours très vivace comme en témoignent les développements récents sur les modèles à champs de phase en mécanique de la rupture. La très ancienne théorie énergétique de Griffith pour la propagation de fissures a été revisité par Francfort et Marigo d'un point de vue variationnel avec des outils d'analyse, comme l'espace des fonctions spéciales à variation bornée, déjà utilisé pour étudier le modèle de Mumford-Shah de segmentation d'images. Cela a donné lieu à de très nombreux résultats théoriques sur ce modèle mais aussi à une nouvelle méthode numérique, dite à champ de phase, qui s'est imposée aussi bien dans les milieux académiques que chez les industriels par sa capacité

à prédire le chemin de fissuration et les possibles branchements de fissure. L'idée de cette méthode est issue d'une approche par Gamma-convergence, due à Ambrosio-Tortorelli, qui permet d'approcher la discontinuité (la fissure) par un nouveau champ qui peut s'interpréter comme une variable d'endommagement. Les résultats numériques sont spectaculaires et reproduisent avec une précision étonnante les constatations expérimentales. Cette très riche interaction est manifestement bien vivante comme le démontre le fait qu'en 2018 les sections 41 et 09 (Mécanique des solides. Matériaux et structures. Biomécanique. Acoustique) ont proposé toutes les deux le recrutement comme CRCN de la même personne!

B. Parité dans les carrières des chercheur.e.s du CNRS

Dans un texte publié dans la gazette des mathématiques: «Parité, la pente est forte et la route sinueuse», I. Chatterji, J. Le Rousseau et B. Rémy font un bilan de la journée du 10 juillet 2019 à l'Institut Henir-Poincaré. On y trouve un constat sans appel: «Sur les vingt dernières années, la part des femmes en mathématiques (sections 25 et 26 confondues) reste à 21 % avec une baisse en section 25 et une légère hausse en section 26.» «Quand au CNRS, avec 19% des femmes parmi les mathématiciens la situation n'y est guère plus réjouissante.» La section 41 du comité national est composée de 9 femmes et de 12 hommes. L'équilibre hommes/femmes, avec au centre des décisions l'excellence scientifique, fait partie des points d'attention de la section. Donnons quelques chiffres qui corroborent le constat fait dans le texte mentionné ci-dessus:

Sur les 1 216 candidatures CR de la période 2017-2019, on compte 220 candidatures féminines, soit 18%. La section 41 du comité national a tenu à rester vigilante sur la part de candidatures féminines à toutes les étapes du processus de recrutement. Ainsi, sur les 237 candidat.e.s auditionné.e.s, 22% ont été

des femmes, pour finalement 23% de recrutements féminins. Sur 195 candidatures à la promotion au grade de DR, 28 étaient des femmes soit 14%. Cette situation a mené à la promotion de 4 femmes sur un total de 19 promotions, soit 21%. Il est notable que la parité au niveau des recrutements CR soit largement portée par les postes en interaction. Sur les 28 recrutements CRCN sans fléchage, seules 5 candidatures féminines ont été retenues, soit 18%. La faiblesse de ces nombres montre le caractère préoccupant de la situation et risque d'avoir des conséquences sur le long terme.

La section 41 n'a pas procédé à une approche simplement comptable des questions de parité : les discussions du comité ont pris en compte, autant que possible, les biais de genre dans l'évaluation et la comparaison des candidatures. Par exemple, un certain nombre de lettres de recommandation fortement genrées n'ont délibérément pas été prises en compte. La section 41 a par ailleurs toujours tenu à garder la question de l'excellence scientifique à la première place des débats.

Cette situation déséquilibrée ne doit néanmoins pas occulter que l'on ne peut pas faire porter au comité national la responsabilité de la faible présence féminine dans les candidatures, et donc parmi les lauréat.e.s (ce phénomène s'inscrit dans des mécanismes complexes apparaissant dès le lycée et mettant en compte des comportements psycho-sociaux complexes qu'il nous faut combattre à tous les niveaux) et la section 41 s'engage dans ce travail à son niveau. Certaines choses doivent être réellement prise en amont. On trouve par exemple dans le même texte publié dans la gazette des mathématiques, une étude concernant la sous-représentation des filles en sciences dans les écoles normales supérieures. Comme mentionné dans le texte, "l'étude menée par Rozenn Texier-Picard (Maîtresse de conférences à l'ENS) s'intéresse aux différences entre le taux de filles parmi les candidat.e.s au concours et ce même taux parmi les admissibles et les classés. Les effectifs des admis, bien trop faibles pour être statistiquement significatifs, sont moins considérés. De 2014 à 2017, pour 17% de candidates, on ne

compte que 9% de filles admissibles, avec un même chiffre pour les classées. Il serait utile de s'interroger sur les compétences validées par le concours. Il faudrait également sensibiliser en amont les enseignant.e.s du secondaire ainsi que les inspecteurs et inspectrices. La section 41 encourage les candidatures femmes sur les postes mis au concours de chercheur.e.s CNRS que ce soit chargé.e de recherche ou Directeur.trice de recherche et assure une bienveillance sur la base d'excellence scientifique.

C. Développement de la science ouverte

La question de l'accès sans entraves aux publications est depuis longtemps un sujet de préoccupation important pour les mathématicien.ne.s. La forte dépendance envers une poignée de grands éditeurs commerciaux, qui possèdent de nombreuses revues mathématiques dont certaines des plus prestigieuses, semble impliquer des dépenses sans cesse croissantes sans rapport avec la qualité des services rendus. Après une longue période sans grands changements, la situation semble évoluer rapidement et plusieurs réactions envers cette situation se sont produites durant les dernières années.

Les dépôts de pré-publications en accès libre, essentiellement arXiv et Hal, sont depuis longtemps largement utilisés par la communauté mathématique, qui a été l'une des premières à s'en emparer. Leur utilisation systématique fait actuellement l'objet de fortes incitations, dans le cadre d'une volonté politique affirmée de pousser vers l'accès ouvert. Ils permettent d'assurer de facto une indépendance forte vis-à-vis des éditeurs commerciaux.

Par ailleurs, la situation change rapidement en ce qui concerne les revues, avec l'émergence de plus en plus de journaux libres et gratuits. Plusieurs revues existantes ont décidé de passer à un accès ouvert complet, dont Acta Mathematica. En France, une excellente initiative du CNRS, la création du centre

Mersenne vise à faciliter la transition des revues qui le souhaitent vers ce modèle de publication. C'est notamment le cas des Annales de l'Institut Fourier (depuis 2015), et d'autres revues devraient bientôt suivre. C'est aussi dans ce cadre que la revue «Algebraic Combinatorics» a été lancée avec succès, pour remplacer une revue payante. Plusieurs nouveaux journaux en accès ouvert ont été lancés : on peut citer la re-création du Journal de l'École Polytechnique, les annales Henri Lebesgue, les revues Epiga, Discrete Analysis et Advances in Combinatorics.

Un autre modèle de publication est aussi proposé par les éditeurs commerciaux : le modèle auteur-payeur, où les articles sont en

accès libre, mais des frais sont demandés à l'auteur. Plusieurs journaux de ce type ont été lancés récemment sous l'impulsion de mathématiciens, comme Forum of Mathematics. Ce mode de fonctionnement reste très controversé en mathématiques, alors que d'autres disciplines y sont habituées. Plusieurs aspects potentiellement délétères de ce modèle auteur-payeur doivent pousser à une grande vigilance.

Le paysage de la documentation mathématique est donc en plein changement. De nombreux mathématiciens sont impliqués dans les initiatives en faveur de l'accès ouvert, et la communauté est globalement attentive à l'évolution du système de publications.

CID 50

GESTION DE LA RECHERCHE

Composition de la commission interdisciplinaire – CID*

Dimitri PEAUCELLE (président de la commission), Axel LÖFBERG (secrétaire scientifique), Florent CALVO, Matthieu CASSIN, Cathy CASTELAIN, Nicole COLLAS, Elsa CORTIJO, Joël DREVET*, Joëlle DUBOIS*, Lise DUMASY, Ivan GUERMEUR*, Béatrice GODART-WENDLING, Isabelle HENRY, Vincent JOMELLI, Lorena KLEIN*, Philippe KLEIN, Frédéric LEBON*, Catherine LECLERC, Véronique MARTIN*, Françoise MASSINES, Dominique MASSOTTE, Marie-Jeanne OURIACHI, Christelle ROY, Michela RUSSO, Solveig SERRE, Alexandre TESTE*, Alexandros TSOUKIAS*, Fabrice VALLÉE.

Résumé

La CID50 fait partie des commissions interdisciplinaires du Comité national de la recherche scientifique. Son rôle est transdisciplinaire. Elle travaille en coordination avec la direction générale déléguée à la science du CNRS et en relation avec la totalité des instituts du CNRS. Elle mène l'évaluation des chercheurs dont une part significative de l'activité est consacrée à la « gestion de la recherche ». Le présent rapport de conjoncture dresse un constat sur la diversité et l'importance des activités couvertes par ce vocable. Il vise également à mettre en évidence des évolutions dans ces activités.

Introduction

La conjoncture est dans sa définition officielle une « conjoncture scientifique ». De ce fait, la commission interdisciplinaire de gestion de la recherche CID50 (anciennement 41) n'avait jusqu'à présent pas été impliquée dans la rédaction de cette œuvre collective du Comité national, arguant du fait que les activités évaluées par la commission sont non scientifiques. Le règlement intérieur ajoute cependant que les rapports « doivent en particulier faire ressortir les points forts et les points faibles de la recherche française ». C'est en s'appuyant sur cette affirmation, que la com-

* Les auteurs du rapport, sont les membres actifs de la CID50 en septembre 2019, ainsi que les membres (indiqués à l'aide d'un astérisque) ayant quitté la CID au cours du mandat.

mission opte cette année pour une expression spécifique sur le sujet de la « gestion de la recherche ». Les réussites dans ce domaine sont des points forts de la recherche française et les écueils illustrent bien des faiblesses. Le rapport est également pour nous l'occasion de rappeler le rôle de la CID50 et de décrire à grands traits les activités des collègues rattachés à cette CID.

I. Activités évaluées

Il arrive, heureusement très rarement, d'entendre dire que la CID50 est destinée aux chercheurs qui n'ont pas d'activité de recherche. Cette assertion, qui sous-entend que ces collègues seraient en infraction par rapport aux attendus de leur métier, est largement infondée. Les collègues évalués par la CID50 ont des activités riches et variées, mais surtout très utiles au fonctionnement de la recherche en France et pour la France à l'étranger. Ils remplissent des fonctions qui, pour partie, pourraient être accomplies par des personnes sans parcours de recherche, mais en y apportant une plus-value essentielle par leur connaissance intime des processus techniques et humains intrinsèques de l'activité scientifique. Plus spécifiquement, les activités évaluées par la CID50 sont décrites par des mots-clés listés ci-après. Nous utilisons le terme « gestion de la recherche » pour englober la totalité de ces activités, tout en reconnaissant que le terme ne reflète pas parfaitement toutes celles-ci. Étant donné leur diversité, il nous semble illusoire de chercher un terme qui décrirait plus parfaitement cet ensemble.

Mots-clés 2016

Les mots-clés de la CID50, proposés en fin de mandature par la commission ayant siégé de 2012 à 2016, sont les suivants :

- définition et management de la stratégie de recherche Europe et International ;
- missions et activités d'intérêt collectif au service de la recherche ;
- infrastructure collective (TGIR) ;
- relations institutionnelles, relations inter-organismes ;
- médiation scientifique ;
- évaluation, audit, expertise.

Nouveaux mots-clés

Les membres de la mandature 2016-2021 ont depuis entrepris de mettre à jour cette liste, réflexion qui en l'état se décline en trois familles de mots-clés. Les chercheurs peuvent relever de plusieurs mots-clés pour toute ou partie de leur activité.

1. Positionnement dans les structures

1.a Direction internationale (direction d'une structure d'ampleur internationale, *eg.* grand équipement international)

1.b Direction nationale (direction d'une structure nationale, *eg.* Institut du CNRS)

1.c Direction de site (présidence d'université, D2RT, délégation régionale...)

1.d Direction locale (direction d'une unité de recherche, unité de services...)

1.e Administration internationale (implication forte dans l'administration d'une structure internationale, direction adjointe par exemple)

1.f Administration nationale (implication forte dans l'administration d'une structure nationale, DAS d'un institut du CNRS, dans un ministère, D2RT adjoint...)

1.g Administration de site (implication forte dans l'administration d'un instrument structurant sur un site)

1.h Administration locale (implication forte dans l'administration d'une structure locale, secrétariat général d'une unité par exemple)

2. Types d'activités

2.a Diplomatie scientifique, Actions internationales

2.b Animation de la recherche (dont coordination, programmation, pilotage, mise en réseau...)

2.c Structuration (réorganisation d'unités de recherche et autres actions structurantes)

2.d Mobilisation des instruments de la recherche (PIA, TGIR...)

2.e Diffusion de la culture scientifique, communication, médiation

2.f Valorisation de la recherche et ingénierie projet

2.g Gestion des ressources humaines

2.h Déontologie et éthique scientifique

2.i Information scientifique et technique

3. Activités d'intérêt collectif

3.a Rayonnement du CNRS

3.b Instances (Comité national...)

3.c Associations

3.d Syndicats

3.e Protection du patrimoine scientifique et technique

Évaluation des chercheurs

Les chercheurs qui estiment que leurs activités relevant des mots-clés ci-dessus deviennent importantes, voire prépondérantes, au

regard de leurs activités de recherche, peuvent dans un premier temps demander à être co-rattachés à la CID50. Dans ce cas, ils sont évalués conjointement par leur section disciplinaire et par la CID, chacune s'intéressant aux activités relevant de son champ de compétence. Par la suite, les chercheurs dont l'activité de recherche est faible, ou qui souhaitent éviter des conflits d'intérêts (eg. Directeur d'institut interagissant avec la section disciplinaire pour les questions de concours, de promotions, etc.) peuvent demander un rattachement exclusif à la CID50. La commission évalue la qualité de leur travail au service de la recherche et l'apport de leur parcours passé de chercheur scientifique à ce travail.

Promotions

Outre le travail d'évaluation des chercheurs, l'autre rôle de la CID est de donner des avis sur des demandes de promotion vers les grades de CRHC, DR1, DRCE1 et DRCE2. À cela s'ajoute le concours DR2 qui – et c'est une spécificité de la CID50 – ne concerne que les chercheurs du CNRS. En effet, cette CID ne peut statutairement pas procéder au recrutement de chercheurs. Les chercheurs peuvent solliciter une promotion auprès de la CID sans y être (co-)rattaché. Il serait toutefois préférable qu'ils aient effectué ce rattachement préalablement à la demande de promotion, mais la CID n'a pas décidé à ce stade d'en faire un critère discriminant.

II. Statistiques

Conformément aux éléments exposés ci-dessus, la population de chercheurs vue par la CID50 est composée de chercheurs rattachés, co-rattachés, mais aussi de chercheurs

non-rattachés connus du fait de leurs demandes de promotions. Le président de la section a également des contacts avec des collègues qui envisagent d'être rattachés à la CID50. Le tableau qui suit indique le nombre de ces chercheurs connus au moment de la rédaction de ce document. La colonne « Autres » correspond aux chercheurs demandant des promotions ou envisageant d'être rattachés.

Tableau 1 : Population des chercheurs CID50.

	Rattachés	Co-rattachés	Autres	Total
CRCN	11	24	14	49
CRHC	5	4	1	10
DR2	12	15	13	40
DR1	14	8	25	47
DRCE	4	8	18	30
Total	46	59	71	176

On constate une dominante de directeurs de recherche (66%), ce qui est cohérent avec le principe de parcours de carrière commençant par des activités de recherche et n'évoluant vers des activités de gestion que dans un second temps. Ce constat est corroboré par l'âge moyen de 57 ans pour la totalité des 176 chercheurs, âge qui n'est pas très différent si l'on considère les chargés de recherche uniquement (55 ans d'âge moyen). Rapporté au nombre total de chercheurs du CNRS (plus de 11 000), le nombre de personnes dont l'activité principale n'est pas directement en lien avec la production de connaissances est donc très faible (1,6%).

Si les femmes représentent 33% des chercheurs permanents du CNRS, leur engagement dans les activités collectives de gestion de la recherche ressort nettement. C'est également le cas si l'on considère les grades séparément. Le taux de femmes DRCE est globalement de 16% au CNRS pour 37% en CID50.

Tableau 2 : Proportion de femmes.

	Femmes	Hommes	% de Femmes
CR	39	20	66%
DR2	16	24	40%
DR1	18	29	38%
DRCE	11	19	37%
Total	84	92	48%

Chaque chercheur de la population considérée est rattaché à un institut du CNRS par son parcours de recherche. Le tableau suivant donne la répartition par instituts et la compare à la répartition des chercheurs entre les différents instituts du CNRS pris dans son ensemble (source : bilan social et parité du CNRS 2017).

Tableau 3 : Origines thématiques.

	CR	DR	% en CID50	% au CNRS
IN2P3	1	9	6%	5%
INC	5	10	9%	14%
INEE	5	10	9%	6%
INP	2	18	11%	11%
INS2I	1	1	1%	5%
INSB	27	30	32%	23%
INSHS	11	6	10%	15%
INSIS	3	9	7%	9%
INSMI	1	3	2%	3%
INSU	4	20	14%	9%

Il est complexe de tirer des enseignements statistiques sur de si petits nombres. On note cependant une surreprésentation de l'INSB en comparaison de son poids global au CNRS. On note également que si la proportion globale est d'un tiers de chargés de recherche pour deux tiers de directeurs de recherche, cette tendance ne se retrouve pas pour l'INSB et est même inversée pour l'INSHS. Une analyse des carrières

res dans ces secteurs pourrait éventuellement donner une explication à ces observations.

Tableau 4 : Répartition par mots-clés

1.a	8	2.a	25	3.a	4
1.b	29	2.b	17	3.b	6
1.c	5	2.c	1	3.c	3
1.d	27	2.d	5	3.d	3
1.e	7	2.e	38	3.e	1
1.f	29	2.f	27		
1.g	15	2.g	2		
1.h	13	2.h	2		
		2.i	2		

La répartition des activités des individus par mots-clés est en grande partie subjective. De plus, les activités d'un même individu peuvent relever de plusieurs mots-clés. Par ailleurs, pour avoir une vision plus étendue des activités, nous avons intégré dans ce dernier tableau les informations connues sur les chercheurs partis à la retraite récemment. De ce fait, ces chiffres sont purement indicatifs sur la répartition des activités des chercheurs connus de la CID50. Les mots-clés avec de petits chiffres ont autant de légitimité que les autres au sein du travail de la commission. Si la forte présence des mots-clés du type « positionnement dans les structures » (1.a à 1.h) est sans surprise (voir section III), les mots-clés 2.e à 2.i font écho à certaines branches professionnelles des ingénieurs et techniciens et méritent des éclaircissements (voir section V).

III. Charges administratives en recherche

Tous les chercheurs sont amenés à consacrer une part de leur temps de travail à des

tâches administratives telles que (liste non exhaustive) : organiser ses missions en France et à l'étranger ainsi que les missions des collègues invités pour des séjours, des séminaires ou des jurys (réservation des moyens de transport, hôtels, demandes de remboursement de frais, etc.) ; gestion des dossiers pour l'accueil des stagiaires, doctorants, chercheurs temporaires (accord du fonctionnaire défense pour les unités en zone à régime restrictif, badges d'accès, comptes informatique, etc.) ; suivi des commandes (envoi des commandes, vérification des livraisons, suivi de la facturation) ; maintenance d'équipements communs, des sites Web, des outils de communication ; dossiers concernant la prévention des risques (par ex. FEVAR, déclaration organismes génétiquement modifiés) ou les autorisations nécessaires à l'expérimentation *in vivo* (saisine auprès du ministère, registres multiples d'utilisation de médicaments et d'animaux) ; gestion financière et administrative des financements sur appel à projet... L'opinion dominante est que l'ampleur et la complexité de ces tâches administratives s'accroissent. S'il est difficile pour la CID50 de valider cette impression par des éléments tangibles, il convient de noter que nous avons très souvent des demandes de collègues s'interrogeant sur l'opportunité d'être rattachés à la CID du fait que les charges administratives les empêchent d'accomplir leurs missions de recherche. Ces collègues sont des responsables d'équipe, des directeurs de groupements de recherche, des responsables de programme scientifique, des directeurs de laboratoire, soit potentiellement plus d'un millier de chercheurs, 10% de l'ensemble des chercheurs du CNRS.

L'amplification des obligations administratives nous semble principalement résulter de trois facteurs :

- la création de nouvelles structures dans le paysage de la recherche ces dernières années (Réseaux technologiques de recherche avancée, Laboratoires d'excellence, Instituts de recherche technologique, etc.) porteuses de politiques scientifiques, mais également de procédures administratives propres ;

– l'accroissement de la part des financements de la recherche par appels d'offre qui conduit chaque chercheur à devenir administrateur d'un ou plusieurs « projet(s) ». À ceci s'ajoute le travail administratif pour le dépôt de réponses aux appels qui s'avère souvent infructueux compte tenu, notamment, d'un taux de financement par l'Agence Nationale pour la Recherche inférieur à 10 % ;

– la baisse des effectifs en personnel de soutien à la recherche en particulier dans les emplois de technicien (-1 465 entre 2008 et 2016 d'après le bilan social du CNRS). Ces emplois de personnels permanents sont parfois partiellement compensés par des embauches en CDD avec la difficulté de pérennisation des compétences.

Des moyens souvent évoqués pour contrer les effets de ces trois facteurs sont l'informatisation et l'automatisation des tâches administratives, ainsi que la réorganisation des services dans le sens de la mutualisation. Sans la mise en œuvre de ceux-ci, la situation serait sans doute plus critique ; cependant, on note que la normalisation des pratiques et le système de surveillance qui en résultent (gestionnaires administratifs réduits à un rôle de contrôle des tâches) dégradent les conditions de recherche des scientifiques et les conditions de travail de tous.

Il est important de noter que l'ampleur des charges administratives est particulièrement sensible dans le cas des directeurs d'unité. Ils ont en effet un rôle de pilotage scientifique au service de communautés de chercheurs, mais sont de plus en plus des gestionnaires de la recherche au sens que lui donne la CID50. Ils peuvent se revendiquer de quasiment tous les mots-clés énoncés précédemment. Doivent-ils pour autant être rattachés à la CID50 le temps de leur mandat de directeur ? Notre opinion est que la chose est possible mais en général non souhaitable. Dans la mesure où leur action est en contact direct avec la production de connaissances dans leur domaine d'expertise directe, il est naturel qu'ils continuent à être évalués par leurs sections disciplinaires. Les sections sont à même d'apprécier l'engagement de gestion des chercheurs dont elles sui-

vent la carrière et se doivent de tenir compte de toutes les facettes de leur activité. Que ce soient des directeurs d'unité, des responsables de projets internationaux, des responsables de grands équipements de recherche, ils ont tous, avant tout, vocation à être évalués pour leur apport au service des disciplines de recherche concernées. Nous pensons que le rattachement à la CID50 doit se limiter aux cas où les chercheurs ont de façon raisonnée et consciente fait le choix d'orienter durablement leur carrière vers la gestion de la recherche, choix qui peut les mener à avoir un rôle au-delà de leur discipline d'origine.

IV. Orientation vers la gestion de la recherche

S'il est impossible de déterminer à coup sûr et sans équivoque les raisons qui font qu'un chercheur s'oriente durablement vers des activités de gestion de la recherche, certains facteurs explicatifs semblent émerger de la lecture des dossiers évalués par la CID50. Comme décrit dans la partie précédente, tous les chercheurs sont amenés à participer à la gestion de la recherche. Naturellement, s'ils se révèlent efficaces, de bonne volonté et que des opportunités viennent à se présenter, cette part de leur activité aura tendance à croître. Pour ceux des chercheurs qui sollicitent ensuite un rattachement à la CID50, cette évolution est le plus souvent vécue *in fine* comme une réussite et les collègues y trouvent un intérêt véritable. Il n'en demeure pas moins que le processus peut conduire à des échecs s'il est plus subi que souhaité. Aussi, deux facteurs fréquents d'orientation vers la gestion de la recherche méritent d'être observés avec attention.

Le premier cas interroge la répartition des tâches de gestion de la recherche au sein des collectifs. En caricaturant, il y aurait d'un côté des collègues prêts à œuvrer pour des tâches utiles à des équipes, quand d'autres y rechignent-

raient pour privilégier une dynamique de réussite personnelle. Ces deux extrêmes peuvent créer des frictions dans les laboratoires, qui seraient sans doute évitables si les tâches de gestion étaient mieux réparties (en volume et dans le temps) et si les activités de gestion étaient mieux valorisées dans l'évaluation (trop de collègues pensent que seule l'excellence scientifique et le rayonnement international doivent guider l'évolution dans la carrière).

Le second cas questionne les conditions de travail au sein des unités de recherche. Des témoignages relativement nombreux alertent sur des situations de chercheurs se déportant d'une activité principale de recherche par manque de moyens (absence d'aide financière pour débiter des recherches, réponses infructueuses aux appels d'offre, etc.), par manque de soutien du laboratoire (peu d'entraide scientifique, d'accompagnement dans les tâches administratives, accès limité aux réseaux d'information, soutien insuffisant pour revenir à la recherche suite à des arrêts de travail prolongés, etc.) ou par dépit quand la réalité du métier de chercheur sur poste permanent ou sénior se révèle très différente de l'activité de recherche pratiquée en début de carrière.

Ces deux cas de figure existent malheureusement et révèlent des dysfonctionnements dans le système de recherche. Ils sont d'autant plus problématiques s'ils affectent des chercheurs en début de carrière. Nous tenons cependant à insister sur le fait que, dans la très grande majorité des dossiers traités par la CID50, les chercheurs manifestent un grand intérêt pour les activités qu'ils mènent, des activités qui sont effectivement très utiles au bon fonctionnement des institutions où ils les exercent.

Ayant évoqué l'orientation, parfois en début de carrière, vers une activité dévolue principalement à la gestion de la recherche, il convient de rappeler que ce processus est également réversible. Nous recevons régulièrement des demandes de cessation de rattachement à la CID50 liées à la reprise d'un travail exclusif de recherche. Cependant, ce retour vers la production de connaissances est peu fréquent car complexe et risqué. Sa réussite

suppose de renouer avec un état de l'art scientifique qui a évolué, souvent très rapidement, et de reprendre des contacts scientifiques fructueux. Aussi l'engagement dans la gestion de la recherche doit être mené de façon raisonnée, d'autant plus que les carrières construites majoritairement ou exclusivement sur des activités de gestion comportent des difficultés spécifiques traitées dans les deux sections suivantes.

V. Chercheurs en gestion de la recherche et ITA

Certaines des activités menées par les chercheurs relevant de la CID50 sont très proches, voir identiques, à des métiers listés dans les branches d'activités professionnelles des ingénieurs et techniciens. En particulier on trouve de fortes correspondances dans les BAP-F et BAP-J comme indiqué ci-dessous.

BAP-F, Culture, communication, production et diffusion des savoirs

Mots-clés CID50 en lien avec ces métiers :

2.e Diffusion de la culture scientifique, Communication, Médiation

2.i Information scientifique et technique

BAP-J, Gestion et pilotage

Mots-clés CID50 en lien avec ces métiers :

1.g Administration de site (implication forte dans l'administration d'un instrument structurant sur un site)

1.h Administration locale (implication forte dans l'administration d'une structure locale, secrétariat général d'une unité par exemple)

2.f Valorisation de la recherche et ingénierie projet

2.g Gestion des ressources humaines

Cette coïncidence n'est pas fortuite car il y a un certain continuum entre les activités des chercheurs et des ingénieurs au CNRS. C'est également le cas pour les autres branches d'activité. Un chercheur en sciences de l'information par exemple pourra faire du développement logiciel pour étayer ses contributions théoriques et en cela mener des activités en lien avec la BAP-E Informatique, Statistiques et Calcul scientifique. Inversement il est fréquent que les ingénieurs de recherche, lorsqu'ils sont titulaires d'un doctorat – ce qui arrive de plus en plus fréquemment –, proposent et développent des connaissances nouvelles qui conduisent à des publications scientifiques. Si la frontière entre les activités des chercheurs et celles des ingénieurs est donc floue, il n'en demeure pas moins que la CID50 est très attentive aux questions de formation à l'exercice des métiers occupés et de plus-value du passé de chercheur dans l'activité exercée. Elle s'interroge également régulièrement – au cas par cas – sur la pertinence d'un passage du corps des chercheurs à celui des ingénieurs de recherche.

La CID50 estime important qu'un chercheur s'orientant vers, ou menant principalement des activités en lien avec les BAP, en particulier F et J citées précédemment, suive des formations adaptées. Il convient en effet de connaître les aspects techniques spécifiques au métier exercé afin de pouvoir interagir en connaissance de cause avec les ingénieurs et techniciens de ce même métier, voire d'intervenir dans les réseaux métiers quand ils existent. Dans ce processus il peut être pertinent de se poser la question d'un changement de corps vers celui des ingénieurs de recherche, processus possible au CNRS, même s'il reste très peu pratiqué. La CID50 constate que ce changement de corps est souvent évoqué par les ressources humaines pour les chercheurs qui se trouvent en difficulté professionnelle. Malheureusement, cette voie n'est pas en soi une solution aux difficultés rencontrées si celles-ci relèvent de problématiques autres que l'activité professionnelle. Le changement de corps, qui requiert un avis de la commission administrative paritaire des ingénieurs de recherche, est

concrètement réalisable à la condition qu'existe un projet professionnel étayé.

Hormis ces cas très minoritaires et complexes, la CID50 tient à noter qu'il y a une véritable légitimité pour les chercheurs, et maintenus comme tels dans le corps de chargés ou de directeurs de recherche, à mener des activités relatives aux BAP F et J. Leur expérience de recherche passée, ou toujours en cours pour une partie de leur temps, leur fournit des compétences supplémentaires spécifiques. Ils ont ainsi par exemple une meilleure connaissance des temporalités de la recherche, une plus grande aisance à interagir avec les chercheurs, possèdent plus d'éléments pour transmettre au grand public, aux acteurs sociaux et économiques, aux décideurs politiques, les réalités des travaux de recherche en cours. Il est donc primordial que les activités des chercheurs relevant de la CID50 soient appréciées à leur juste valeur, par des pairs chercheurs et non dans un cadre hiérarchique et qu'ils aient accès comme tous les autres chercheurs à l'intégralité des possibilités de carrière.

VI. Gestion RH des cadres dirigeants

Le CNRS, comme l'ensemble des organismes de recherche, a tout intérêt à développer une politique de détection des personnels à haut potentiel et d'accompagnement dans leur carrière, tant pour son fonctionnement interne que pour son rayonnement au sein d'autres organismes ou administrations. La politique de l'organisme vis-à-vis de cette population est menée par la direction déléguée aux cadres supérieurs (DDCS) qui conduit des actions de détection et d'accompagnement. Compte tenu du périmètre de la CID50, les liens avec la DDCS peuvent sembler relever de l'évidence, ils nécessitent néan-

moins d'être renforcés selon des modalités à définir.

Par l'évaluation de tous les dossiers par la commission au cours de la première partie du mandat, une typologie a pu être établie :

– Les parcours à des postes de direction ou de direction adjointe au sein de l'organisme, dont l'évaluation est relativement aisée puisque les types d'activités réalisées sont connus des évaluateurs et peuvent faire l'objet de comparaison. Il en résulte que les promotions de ces chercheurs ne présentent pas de différences majeures par rapport à celle de leurs homologues aux profils purement scientifiques évalués par les sections disciplinaires. En revanche, leurs évolutions de carrière en termes de possibilités de changement de poste méritent d'être mieux accompagnées. Il est normal et nécessaire qu'il y ait régulièrement des changements dans les postes que ces chercheurs occupent. Il faut que cette évolution de carrière soit anticipée au mieux par eux-mêmes et par l'organisme, que les procédures d'accès à d'autres fonctions soient transparentes et mieux connues, pour que les chercheurs qui se sont engagés dans ces carrières aient des perspectives à leur disposition à la hauteur des compétences acquises dans l'exercice de leurs fonctions.

– Les parcours hors organisme qui regroupent des situations plus complexes, avec plus de variabilité d'un individu à l'autre et qui sortent en grande partie du champ de visibilité du CNRS et de la CID50. Ces chercheurs sont en détachement ou mis à disposition auprès d'autres structures (autres organismes, administrations, ambassades, associations...). Leur connaissance du fonctionnement de la recherche opérationnelle, des instances de décision de leur organisme d'origine et de ses évolutions s'amenuise inévitablement avec le temps. Le CNRS n'a pas de procédure établie pour garder un contact étroit avec ces chercheurs et connaître le détail de leur situation ni de leur activité. Les chercheurs détachés ne sont par exemple plus évalués périodiquement par le Comité national.

Leurs dossiers arrivent cependant à la CID50 à l'occasion de demandes de promotion qu'ils peuvent solliciter, ou à leur retour dans l'organisme.

Concernant ces chercheurs, la CID50 préconise que des méthodes de suivi soient renforcées pour maintenir le lien avec le CNRS tout au long du parcours en dehors de l'organisme. Ce suivi, auquel la CID50 serait prête à participer, permettrait entre autres de mieux connaître les métiers exercés, de positionner plus précisément les demandes de promotion au regard des autres dossiers traités et d'anticiper les difficultés à rédiger un rapport d'activité lors du retour au CNRS. La qualité des dossiers de carrière doit permettre à ces chercheurs d'évaluer le niveau de responsabilité, d'autonomie, de rayonnement des postes qu'ils ont assumés. Un suivi tout au long du détachement, qui contextualiserait le lien entre le CNRS et le poste occupé, permettrait sans doute à l'agent de mieux faire le lien entre son institution et ses missions, et ainsi de répondre de façon plus concrète à cette exigence.

Pour ce qui est du retour des chercheurs en fin de parcours hors CNRS, pour cause de fin de mandat dans le poste occupé par exemple, il rejoint ce que nous avons indiqué pour tous les chercheurs dont la fonction de direction ou d'administration prend fin. Il est cependant encore plus problématique pour peu que les chercheurs concernés n'aient pas demandé de promotion au cours de cette période hors CNRS. Ils se trouvent alors positionnés dans les grilles à des niveaux significativement inférieurs à leurs rémunérations et aux responsabilités occupées précédemment. Le suivi de ces chercheurs par le CNRS pendant leur période de détachement ou de mise à disposition devrait permettre de compenser partiellement ces difficultés. Il convient également de mettre en place un accompagnement au retour qui soit spécifique et individualisé tant pour leur bénéfice que pour celui du CNRS, qui peut gagner grandement aux connaissances que ces chercheurs ont acquises au cours de leur parcours.

VII. Production de documents en gestion de la recherche

Les activités relevant de la CID50 ne génèrent pas ou peu de documents comparables à ceux produits par l'activité de recherche du type articles de recherche dans des revues spécialisées, livres ou chapitres de livre, documents qui sont au cœur de l'évaluation des scientifiques. Ce constat soulève deux questions : celle des supports pour évaluer des activités de gestion de la recherche ainsi que celle de la transmission des compétences acquises et des pratiques.

La première question n'est pas fondamentale dans la mesure où l'évaluation des chercheurs relevant de la CID50 se réalise sur la base de rapports d'activité honnêtes et d'une grande qualité informative. Si certains rapports s'apparentent parfois à des listes d'items du type fiche de poste ou *curriculum vitae*, la majeure partie des chercheurs fournit heureusement des documents qui décrivent précisément le contenu de leur activité, leurs réussites et leurs difficultés. Certains vont jusqu'à inclure des textes issus de leur travail tels que des rapports internes sur le bilan du service qu'ils dirigent. La CID50 est persuadée que ce type de document est probablement plus abondant que ce qui nous est donné à voir. Ces documents pourraient renforcer la qualité de l'évaluation faite par la commission, surtout si, à la manière des publications scientifiques, ils étaient disponibles à la lecture, et donc à la critique. Loin de nous l'idée d'imaginer un système d'édition avec relecture par des pairs, etc. Il s'agit de suggérer qu'un document prévu comme pouvant être lu par ses collègues sera moins susceptible de comporter des exagérations inutiles.

Ce qui motive cette section concernant les documents issus de l'activité de gestion de la recherche est néanmoins surtout la conviction que l'échange de compétences et de connaissances est intrinsèquement utile. Les cher-

cheurs ayant évolué vers une activité de gestion de la recherche apportent à cette activité la connaissance des pratiques de recherche, l'une d'entre elle étant de savoir synthétiser et rendre compte par écrit. L'échange de connaissances est au cœur de la démarche des scientifiques et il peut en être même pour les compétences acquises en gestion de la recherche. Il ne s'agit pas de prétendre que les chercheurs de la CID50 devraient devenir des analystes de leurs pratiques et se transformer en chercheur relevant de la CID53 «Méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques». Plus modestement, il s'agit d'affirmer que des documents existants relevant de la gestion de la recherche mériteraient d'être plus accessibles et de participer ainsi de l'ouverture du système public de la recherche vers le plus grand nombre.

La CID50 suggère ainsi que les chercheurs n'hésitent pas à poster dans l'archive ouverte qu'est HAL des documents issus de leur activité de gestion de la recherche, tout en restant compatible avec la nature de leur activité. On peut penser à des documents comme : les bilans et projets des équipes de recherche produits à l'occasion des évaluations des unités de recherche (ou des versions amendées évitant le côté par trop administratif des documents demandés par l'HCERES) ; des bilans d'activité annuel des conseillers scientifiques en ambassade ; des supports utilisés pour la médiation scientifique ; des supports pour présenter les capacités de recherche collaborative académie-industrie d'une unité de recherche ; des bilans à l'issue d'un appel d'offre concernant la quantité et la qualité des réponses ainsi que le processus ayant conduit aux décisions ; des rapports sur la réalité des menaces motivant la protection du patrimoine scientifique et technique ; des rapports de conjoncture des sections du Comité national, etc. Cette suggestion peut concerner tous les chercheurs car tous ont une part de leur activité qui touche à la gestion de la recherche. Elle est d'autant plus forte pour ceux rattachés ou co-rattachés à la CID50. Une telle pratique renforcerait la légitimité des carrières de chercheurs ayant évolué vers la gestion de la recherche.

Conclusion

L'existence d'une commission dédiée à l'évaluation des activités de gestion de la recherche est une originalité du CNRS en France et plus largement une originalité dans le paysage international de la recherche. À l'heure où des acteurs politiques disent souhaiter encourager la mobilité des chercheurs vers d'autres métiers, par exemple dans l'administration publique, le Comité national de la recherche scientifique, œuvrant au service du CNRS pour l'évaluation de ses chercheurs, reconnaît et a pour vocation d'accompagner ces mobilités. Alors même que l'on entend dire que les chercheurs sont évalués uniquement sur la base d'indices bibliométriques, la CID50 par son existence même, démontre que ce n'est absolument pas le cas. Toutes les missions des chercheurs du CNRS sont évaluées par les sections du Comité national, et au travers de la CID50 cette évaluation va même au-delà des missions principales du CNRS. Mieux encore, l'évaluation exigeante qu'est l'évaluation par les pairs est appliquée à l'intégralité des chercheurs, y compris ceux occupant des postes de direction. Aussi, l'existence pérenne de la CID50 et son rôle au service du CNRS sont une richesse du système de recherche publique en France.

Outre son activité d'évaluation des chercheurs et la participation à leur promotion, le CID50 est un observatoire des évolutions du métier de chercheur scientifique. Au travers de ce rapport de conjoncture, nous avons complété la définition de la terminologie « gestion de la recherche », en particulier par l'ajout de nouveaux mots-clés et de données statistiques ; nous avons relayé et questionné le constat qu'une part croissante de l'activité des chercheurs est désormais dévolue à l'administration de la recherche ; nous avons mis en garde sur les problèmes posés par une orientation précoce vers une carrière exclusivement dédiée à la gestion de la recherche ; nous avons précisé le distinguo entre chercheurs et ingénieurs quand ceux-ci ont des activités pouvant sembler très proches et précisé la plus-value que représente une connaissance intime de l'activité de recherche ; nous avons recommandé l'amélioration du suivi des chercheurs dans leurs mobilités hors de l'organisme ; nous avons finalement mis en avant l'intérêt que représente la diffusion de documents issus de la gestion de la recherche.

Ces analyses portent non seulement sur les chercheurs relevant totalement ou partiellement de la CID50, mais il nous semble qu'elles reflètent plus généralement certaines évolutions du métier de chercheur dans son ensemble.

Annexe I

BAP : Branche d'activité professionnelle	HAL : Archive ouverte du Centre pour la communication scientifique directe
CDD : Contrat à durée déterminée	HCERES : Haut conseil à l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur
CID : Commission interdisciplinaire	IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules
CID50 : Commission interdisciplinaire de gestion de la recherche	INC : Institut de chimie
CNRS : Centre national de la recherche scientifique	INEE : Institut écologie et environnement
CR : Chargé-e de recherche	INP : Institut de physique
CRCN : Chargé-e de recherche de classe normale	INS2I : Institut des sciences de l'information et de leurs interactions
CRHC : Chargé-e de recherche hors classe	INSB : Institut des sciences biologiques
D2RT : Délégation régionale à la recherche et à la technologie	INSHS : Institut des sciences humaines et sociales
DDCS : Direction déléguée aux cadres supérieurs	INSIS : Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes
DR1 : Directeur-riche de recherche de première classe	INSMI : Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions
DR2 : Directeur-riche de recherche de seconde classe	INSU : Institut national des sciences de l'univers
DRCE : Directeur-riche de recherche de classe exceptionnelle	FEVAR : Fichier d'évaluation des risques
DRCE1 : Directeur-riche de recherche de classe exceptionnelle de premier échelon	PIA : Programme des investissements d'avenir
DCRE2 : Directeur-riche de recherche de classe exceptionnelle de deuxième échelon	TGIR : Très grande infrastructure de recherche

CID 51

MODÉLISATION, ET ANALYSE DES DONNÉES ET DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES : APPROCHES INFORMATIQUES, MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUES

Composition de la commission interdisciplinaire – CID

Franck PICARD (président de la commission), Myriam FERRO (secrétaire scientifique), Alice CLEYNEN, Marie DOUMIC, Xavier DUCHEMIN, Guillaume FERTIN, Jonathan FILEE, Philippe JUIN, Romain KOSZUL, Rafael LABOISSIÈRE, Dominique LAVENIER, Thérèse MALLIAVIN, Antonio MONARI, Isabelle NONDIER, Françoise PEYRIN, Pierre POUGET, David VALLENET, Rufin VANRULLEN, Stéphane VEZIAN, Aleksandra WALCZAK.

Résumé

La CID 51 s'intéresse aux interactions entre les sciences de la modélisation (mathématique, informatique, physique) et les sciences du vivant. Ces interactions sont anciennes et se nourrissent des avancées de chaque discipline. Or la biologie, comme les sciences de la modélisation ont connu des avancées spectaculaires ces dernières années, technologiques et conceptuelles. Ces progrès rendent nécessaire la réflexion sur une nouvelle interdisciplinarité et sur l'exploration de défis scientifiques émergents aux interfaces qu'il semble crucial de relever. Ce rapport de conjoncture pour la période 2016-2021 est donc organisé en six

axes qui n'ont pas vocation à être exhaustifs, mais qui ont permis aux membres de la CID 51 de structurer une réflexion sur l'interdisciplinarité de demain. En préambule de notre rapport scientifique, nous proposons de dresser le premier portrait des chercheuses et des chercheurs rattachés à la CID 51.

Introduction

En 2018 la revue Nature propose de recenser les 100 articles les plus cités toutes discipli-

nes confondues : ClustalW (outil d'alignement multiple de séquences publié en 1994) obtient la 10^e place (40,289 citations), suivi par BLAST (12^e-14^e publiés en 1990 et 1997, 38,380 et 36,410 citations), l'algorithme du Neighbor Joining (20^e, publié en 1987), le bootstrap en phylogénie (41^e, publié en 1985), le false discovery rate (FDR, 59^e position publié en 1995). Ce classement illustre l'impact considérable des sciences de la modélisation aux avancées de la biologie de la fin du xx^e siècle. L'interdisciplinarité, dont le socle repose sur un dialogue constant entre disciplines scientifiques, s'est indéniablement renforcée au gré des avancées technologiques, et notamment de la massification de la production de données biologiques. Mais au-delà des aspects techniques, ce dialogue repose sur la capacité des sciences de la modélisation à faire émerger de nouveaux concepts permettant la meilleure compréhension des systèmes biologiques, et sur les défis posés aux sciences formelles par les sciences du vivant. Chaque discipline suivant sa propre évolution scientifique : les mathématiques, l'informatique, la physique et la chimie ont elles aussi connu des avancées importantes pouvant avoir des impacts en biologie, comme les grandes matrices aléatoires, et le transport optimal, l'optimisation combinatoire, et l'intelligence artificielle, la physique hors équilibre et les attracteurs continus, la chimie quantique, et les calculs d'énergie libre. Le rôle de la CID 51 est d'accompagner l'évolution de l'interdisciplinarité qui se transforme elle aussi, en identifiant, encourageant, et en promouvant les interactions qui potentiellement pourront faire émerger de nouveaux concepts aux interfaces entre les sciences biologiques et des sciences de la modélisation.

I. Les chercheurs et chercheuses de la CID 51

Depuis 2009 les CID du CNRS suivent la carrière des agents qu'elles recrutent, et les

étapes de la carrière de leurs lauréats hors la promotion. Après leur renouvellement en 2012, le Secrétariat Général du Comité National a sollicité tous les agents recrutés par les CID entre 2009 et 2012 pour qu'ils choisissent une CID de rattachement. Certains ont choisi la CID 51, d'autres n'ont pas répondu ou n'ont pas souhaité être rattachés à une CID. Depuis 2013, le SGCN rattache systématiquement tout lauréat des concours à leur CID de recrutement, laquelle devient leur section secondaire. Fin 2018, la CID 51 a lancé une enquête auprès des chercheuses et chercheurs rattachés et/ou recrutés par la CID 51, pour dresser un portrait des membres de la CID (participation de 88%).

A. Portrait

En 2019, la CID 51 comportait 97 chercheuses et chercheurs, dont 60 sont CRCN (16 femmes), 30 DR2 (9 femmes), 7 DR1 (4 femmes) et 1 DRCE (0 femme). La répartition hommes/femmes est homogène selon les grades (~2/3 hommes, ~1/3 femmes). Les chercheurs rattachés à la CID 51 ont majoritairement (60%) été recrutés par la CID 51, ou par des sections associées : mathématiques 41 (6 chercheurs), neurosciences 25-26 (6), chimie 13-16-20 (5), physique 5 (3), et 75% des DR2 rattachés à la CID 51 ont été recrutés DR2 par la CID 51. Les DR1 ont quant à eux été promus en chimie (section 13-20, 3 promus), en biologie (section 21, 2), en mathématiques (section 41, 1) et en informatique (section 6, 1). Les membres de la CID 51 sont rattachés à titre principal aux sections d'informatique 6-7 (10 et 10 chercheurs respectivement), de mathématiques 41 (16) et de physique 2-5-11 (6-3-3). Le concours de recrutement concerne une moyenne de 61 candidats (CR) et 40 candidats (DR2) avec des taux de succès de 4% et 8% respectivement, ce qui en fait un des concours les plus sélectifs. L'âge moyen de recrutement (nombre d'années post thèse) a augmenté pour les CR, qui ont été recrutés en moyenne 5,5 années post thèse après 2015, alors qu'ils étaient recrutés en moyenne 4 ans post thèse entre 2005 et 2015. Les recrutements DR2 quant

à eux interviennent plus tôt dans la carrière : 12,2 années post thèse pour les DR2 recrutés après 2015, contre 14,35 années sur la période 2005-2015, et 15 ans avant 2005. Lorsqu'on demande aux CR quelles sections ils envisagent pour le concours DR2, la majorité (90%) envisage de postuler en CID 51, et 43% envisagent de postuler dans une section en plus de la CID 51, génomique, biologie cellulaire et immunologie 21-22-27 (8-1-2), chimie 13-16-20 (3-2-2), écologie 29 (6), neurosciences 25-26 (2-4), informatique 6-7 (3-4), mathématiques 41 (3).

Enfin, les promotions DR1 ont quasiment toutes été obtenues après 2017 (6 promotions sur 7), et interviennent en moyenne 7,42 années après le recrutement DR2. Les CID ne faisant pas de promotion, les promotions DR1 dépendent essentiellement de la politique de promotion de l'interdisciplinarité dans les sections : parmi les 4 DR rattachés à la CID 51 et dépendant d'une section de chimie à titre principal (13, 16, 20), 3 ont été promus DR1, alors que les sections de mathématiques et d'informatique n'ont promu que 1 DR1 sur 6 (mathématiques), et 1 sur 7 (informatique), aucun en physique (6 DR2), aucun en neuro (4 DR2) et 1 sur 6 en génomique (section 21-24).

Les membres de la CID 51 effectuent leur recherche dans des unités INSB (34%), INS2I (20%), INP (14%), INSMI (13%), INC (6%), INEE (6%), INSIS (3%), et deux chercheurs rattachés à la CID 51 travaillent dans une unité INSERM. Deux tiers (63%) des sondés considèrent que leur laboratoire d'accueil est une structure de recherche interdisciplinaire. Les membres de la CID 51 accèdent aussi aux distinctions, avec 4 médailles de bronze, une d'argent (malgré l'absence de voie directe pour la désignation de médailles par les CID), et plusieurs prix de sociétés savantes.

B. Financements

Concernant les sources de financement sur projet sur les 5 dernières années, les membres de la CID 51 ont déposé un total de 127 projets

ANR en tant que coordinateur, 164 en tant que responsable de tâche, et 91 en tant que collaborateurs, avec des taux de succès respectifs de 26%, 37% et 45%. On peut comparer ces chiffres au taux de succès de la nouvelle CES 45 de l'ANR (*Mathématique, Informatique, automatique, traitement du signal pour répondre aux défis de la biologie et de la santé*) qui était de 16,5% en 2018. Le taux de succès des jeunes chercheurs (thèse postérieure à 2008) est quant à lui de 26% pour les coordinateurs. Ensuite, un tiers des chercheurs de la CID 51 a déjà eu accès à des financements nationaux hors ANR, qui proviennent pour un tiers des organismes de recherche biomédicale (FMR, INCA, Plan Cancer, INSERM, ARC), indiquant qu'une part non négligeable de l'activité des membres de la CID 51 est orientée vers les applications biomédicales. Pour ces appels, il ne nous est pas possible de déterminer si les projets concernaient des travaux méthodologiques ou applicatifs en collaboration avec des biologistes. Les financements CNRS font également partie des financements accessibles aux membres de la CID 51, le dispositif PEPS étant le plus répandu (34 projets). La moitié des chercheurs ont déjà eu accès à un financement relatif aux missions pour l'interdisciplinarité du CNRS, mais ces dispositifs sont critiqués pour le manque de lisibilité des modalités et des possibilités de dépenses, avec des calendriers souvent trop contraints. Leur attrait réside principalement dans la souplesse de l'appel d'offre. Est mentionnée également la multiplicité et donc le manque de lisibilité de l'ensemble des appels (PEPS, Osez l'interdisciplinarité, DEFI, PICS, Mission interdisciplinarité). Globalement, le fonctionnement de la mission pour l'interdisciplinarité semble mal compris par les chercheurs de la CID 51. Les structures universitaires financent également les chercheurs de la CID 51, puisque près de 60% ont déjà obtenu des financements provenant d'IDEX, de LABEX ou de chaires, ce qui indique que les financements locaux permettent de soutenir la recherche interdisciplinaire.

Les membres de la CID 51 demandent et obtiennent également des financements à l'ERC (starting : 3 sur 17 demandes, consolidator 2 sur 10, advanced 0 sur 1). Globalement,

les financements ERC sont perçus comme étant souples et efficaces, même si trop compétitifs. D'autres instruments européens hors ERC financent également les membres de la CID 51, principalement des ETN (4 obtenus pour 8 demandes), ITN (3 obtenus pour 4 déposés), et des projets FET (2 obtenus pour 3 dépôts), mais le rôle respectif des membres de la CID 51 n'est pas établi.

Seulement 40 % des chercheurs de la CID 51 considèrent qu'au cours des 5 dernières années, ils ont obtenu des financements suffisants pour que leurs recherches soient compétitives sur le plan international. L'enquête n'a pas permis d'établir le montant ni la répartition des financements. Le taux insuffisant de financement est rappelé, rejoignant ainsi l'ensemble de la communauté scientifique. La spécificité de l'évaluation des projets interdisciplinaires apparaît comme un point central pour garantir la crédibilité des décisions de financement. À ce sujet on peut noter que l'ANR a récemment mis en place la CES 45 dont les thématiques correspondent au cœur de métier de la CID 51.

Les membres de la CID 51 montrent un intérêt sur les financements interdisciplinaires s'appuyant sur des appels à projets succincts et ciblés, demandes qui permettent l'embauche de personnel, notamment pour les thèses interdisciplinaires. Un point central est le financement des personnels techniques sur les projets interdisciplinaires à moyen et long terme, car l'enquête montre que la majorité des chercheurs de la CID 51 estime que les financements actuels ne permettent pas de financer correctement les techniciens et ingénieurs. Enfin, les contraintes institutionnelles (entres instituts du CNRS par exemple), souvent difficiles à déchiffrer, sont vues comme un frein au dynamisme des projets interdisciplinaires.

C. Valorisation

Concernant la valorisation, environ 60 % des chercheurs de la CID 51 n'ont jamais fait appel au CNRS pour la valorisation (brevet, logiciel etc.) ou la propriété intellectuelle de

leurs travaux, et la moitié de ceux qui y ont fait appel sont satisfaits. L'enquête fait ressortir une demande d'amélioration de l'accompagnement pour la valorisation des activités spécifiques des membres de la CID 51, notamment pour les logiciels. Actuellement, les chercheurs de la CID 51 font souvent appel à d'autres structures (SATT) ou d'autres organismes (INSERM, INRA, INRIA). Est notée cependant une amélioration grâce à la mise en place de CNRS innovation, qui ne semble toutefois pas très connu de l'ensemble de la CID.

II. La biologie face aux défis des grandes masses de données

A. Des avancées technologiques majeures

La biologie moléculaire et cellulaire des dernières années est marquée par l'accessibilité remarquable des données à haut débit : les technologies de séquençage sont désormais utilisées en routine à bas coût, pour le séquençage de génomes entiers, la métagénomique, la détection de variants génétiques, la quantification de la transcription et de sa régulation. Les technologies récentes mettent l'accent sur des lectures plus longues, permettant de réduire les problèmes d'assemblage (au prix d'un nombre d'erreurs plus élevées), mais aussi l'identification de transcrits (notamment épissés). L'accessibilité croissante de ces technologies permet le développement de plateformes d'analyse dans les laboratoires et les établissements hospitaliers. De nouvelles attentes émergent car les praticiens ont besoin de standards de stockage et d'analyse pour s'inscrire dans une démarche de recherche reproductible à temps long. C'est un défi immense étant donné les contraintes importantes de confidentialité et de gestion

des données (notamment en santé), dans un contexte où les technologies évoluent rapidement, et où les biologistes doivent se former pour appréhender les enjeux méthodologiques de l'exploitation de ces données.

Ces avancées techniques accompagnent deux sauts technologiques majeurs des années récentes : la possibilité de séquencer des molécules uniques et la possibilité d'accéder aux caractéristiques moléculaires de cellules uniques. Il s'agit désormais d'accéder à « l'identité » d'une population de cellules, sur la base des quantifications individuelles de leur génome, transcriptome, épigénome, et protéome. Ce développement de techniques de séquençage s'accompagne également de l'explosion de l'utilisation d'imagerie cellulaire, pour combiner les informations moléculaires (séquençage in-situ) et tissulaires (microscopie confocale à haute résolution). Les données d'imagerie sont désormais incontournables pour l'étude des processus physiopathologiques, avec de nouvelles techniques d'imagerie quantitative multi-échelles et multi-contrastes (la cryo-microscopie à résolution atomique aura certainement un impact considérable en biologie et bioinformatique structurale). Le développement de l'imagerie compressive est très prometteur, en intégrant la co-conception de l'instrumentation et de la chaîne de traitement des données au niveau même de la formation de l'image, ouvrant de nouvelles possibilités d'imagerie multi-spectrale ou vidéo temps réel.

B. Les enjeux des bases de données biologiques et biomédicales

La constitution et le maintien de bases de données consultables et exploitables est un enjeu qui accompagne les progrès technologiques, et qui doit être mis désormais en perspective des besoins considérables des techniques d'apprentissage automatique, dont les performances dépendent en grande partie

des données d'entraînement correctement annotées. Les compétences en jeu concernent le matériel informatique stricto sensu ainsi que la recherche en informatique pour mettre au point des bases de connaissances robustes et consultables par tous. Face au déluge de séquences générées en génomique, ainsi qu'à la production massive d'images (par exemple en neurosciences), les communautés doivent s'adapter en utilisant à la fois les bases centralisées (dont le modèle est remis en question face à la charge matérielle et financière du maintien de ces banques), ainsi que de nombreuses bases plus locales et spécialisées, chacune reposant sur des formats standard, et s'inscrivant dans la logique de la science ouverte, qui devient une condition nécessaire à la publication.

Les défis considérables concernent l'hétérogénéité des données stockées, notamment en santé : séquences, images, données physiologiques, suivi temporel. Définir un modèle de développement informatique pérenne semble un défi majeur des prochaines années pour coordonner l'acquisition de ces données, leur stockage, leur annotation, leur accessibilité, leurs traitements, tout en respectant les normes qualité, qui peuvent être spécifiques, avec des contraintes importantes en santé notamment concernant la traçabilité et la confidentialité. Ces enjeux s'inscrivent dans des axes de recherche informatique d'actualité relatifs aux grandes masses de données. L'ingénierie des connaissances, la fouille de données, le web sémantique, l'interconnexion de réseaux complexes sont au cœur des problématiques soulevées par l'exploitation de ces bases de données.

La sécurité des données et des réseaux, ainsi que la protection de la vie privée sont également des verrous à lever dans ce domaine. Le niveau de sûreté nécessaire pour faire du diagnostic n'est en effet pas comparable à celui rencontré habituellement en biologie prédictive. Ces exigences s'accompagnent d'aspects éthiques et de respect de la vie privée liés à l'exploitation bioinformatique de données individuelles à grande échelle (differential privacy). Il nous faut imaginer des envi-

ronnements non centralisés, interopérables, qui puissent gérer cette hétérogénéité tout en assurant la confidentialité des patients. C'est l'une des clés pour exploiter de manière optimale la richesse de ces données.

Enfin, l'exploitation efficace de ces masses de données ne peut se passer du calcul haute performance (HPC) pour les traitements à haut débit, ce qui pose des défis considérables en termes d'infrastructures de calcul, de stockage de l'information, d'activité de service pour les laboratoires producteurs de données, ainsi que de production de logiciels d'analyse. La concurrence internationale est extrêmement sévère dans ce domaine, car des centres comme le Broad Institute ou l'EBI et le NCBI disposent d'une force de frappe considérable en termes d'ingénieurs et chercheurs en bioinformatique, ce qui leur permet de produire des méthodes pertinentes rapidement, et d'imposer ensuite leurs standards d'analyse.

C. Vers une nouvelle science des données biologiques et biomédicales

L'analyse de très grandes masses de données est un domaine de recherche extrêmement pointu et dynamique ces dernières années, grâce à la synergie entre différents domaines des mathématiques (statistique, optimisation, physique statistique, modélisation probabiliste ou déterministe) et de l'informatique (intelligence artificielle, fouille de données, algorithmique des séquences, représentation de connaissances). L'enjeu est le suivant : comment exploiter au mieux le potentiel de l'ensemble des données générées, comment les représenter pour mieux comprendre leur hétérogénéité, comment inférer les paramètres de modèles mathématiques ou physiques permettant de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes biologiques, et comment intégrer les différents niveaux d'organisation biologique dans les modèles ? La représentation et la visualisation des données posent des défis considérables qui

sont partagés par de nombreuses disciplines. Les visualisations linéaires multidimensionnelles classiques sont désormais supplantées par les méthodes non linéaires qui font appel à des notions complexes de géométrie, avec le développement de méthodes d'analyse topologique des données qui connaissent un essor remarquable et très prometteur. Ces données quantitatives nécessiteront ensuite des analyses statistiques et mathématiques pour inférer les réseaux ou les structures sous-jacentes en utilisant par exemple la théorie des graphes, la théorie du signal et la physique statistique. Afin de construire une vision intégrée des systèmes biologiques, il sera important de faire le lien entre les différentes échelles d'observation à l'aide d'approches de modélisation dynamique, telles que des équations algébriques, différentielles, aux dérivées partielles et probabilistes, ou encore des modèles d'agents (individus-centrés). L'étude des interactions, qu'elles soient moléculaires (réseaux de gènes) ou cellulaires (différenciation, signalisation), devra faire appel à des méthodologies innovantes qui incluent notamment les récents développements des méthodes d'inférence causale. Aussi, la disponibilité de données moléculaires sur des populations entières de cellules rend possible l'étude des états cellulaires en tant que continuums, faisant appel à de nouvelles approches fondées sur le transport optimal pour étudier les transformations des états de différenciation cellulaire. Le défi méthodologique est bien devant nous pour appréhender cette complexité jamais rencontrée, notamment grâce à la quantification de la stochasticité des phénomènes biologiques à grande échelle. Il ne pourra être relevé qu'en conjuguant les forces des différentes approches physiques, mathématiques et informatiques, pour faire émerger une véritable multidisciplinarité autour des problématiques de biologie et de santé.

D. Apprentissage pour la biologie moléculaire et la santé

Parmi l'ensemble des approches mathématiques et informatiques mises en œuvre pour répondre au défi de l'analyse des grandes masses de données, les méthodes d'apprentissage automatique suscitent de nombreuses espérances. Le cadre de ces méthodes est d'apprendre une relation entre des variables de sorties (y) et des variables d'entrée (x), par un modèle de type $y = f(x)$, sans spécifier la forme de la fonction f à inférer. Ces méthodes apparaissent particulièrement intéressantes dans les cas où le fonctionnement du système biologique n'est pas connu précisément. Une spécificité des méthodes d'apprentissage automatique est leur objectif profondément prédictif : elles cherchent à prédire y en fonction de x , comme par exemple la prédiction de l'expression des gènes à partir de caractéristiques génétiques ou épigénétiques. Un des enjeux majeurs de l'apprentissage automatique est de sélectionner l'ensemble des variables (ou *features*) sur lesquelles reposent l'apprentissage d'une règle de prédiction performante, par exemple apprendre quels sont les gènes dont l'expression est prédictive de la survie d'un patient. Alors que beaucoup de développements ont été proposés dans les années 2000 avec le développement de la statistique en grande dimension, les réseaux de neurones ont connu un regain de popularité grâce au développement de nouvelles architectures de calcul. La puissance de ces approches est de proposer des méthodes computationnelles pour l'apprentissage de la fonction f en transformant les données d'entrée x en plusieurs étapes. Mais l'apprentissage automatique s'est surtout développé pour l'analyse d'images et de textes, dont le transfert des compétences à la biologie est un enjeu important. À ce titre, l'imagerie cellulaire et cérébrale bénéficie d'ores et déjà d'un corpus de méthodes extrêmement efficaces pour faire face à l'imagerie à haut débit. Une connexion directe avec la biologie moléculaire s'est opérée par le biais de

l'analyse de séquence, car les techniques mises au point, comme les réseaux de convolution, pouvaient être transposées sans trop de difficulté. Un des défis reste cependant le développement d'architectures de réseaux qui soient dédiés aux problématiques biologiques, avec également l'utilisation d'architectures de calcul GPU et de cadres de développement (TensorFlow, PyTorch) non conventionnels pour les laboratoires de biologie. Les résultats de l'apprentissage automatique en biologie ces dernières années sont très prometteurs et soulèvent des défis théoriques majeurs. Un des principaux blocages concerne l'identification des variables ayant permis l'apprentissage du modèle, car l'objectif profondément prédictif des méthodes d'apprentissage ne permet pas toujours d'expliquer et d'interpréter les résultats biologiques. Coupler modélisation mathématique, inférence causale et apprentissage statistique pourrait permettre de dépasser ce blocage.

III. Biologie intégrative et des systèmes

La biologie des systèmes émerge dans les années 2000, notamment grâce aux technologies permettant la quantification de phénomènes moléculaires et cellulaires à différentes échelles. La notion de complexité émerge de ces différentes phases de collecte de données, car le défi est d'intégrer ces différentes strates d'information pour mieux comprendre le fonctionnement des systèmes biologiques qui sont hétérogènes, dynamiques, variables, en évolution et en interaction constante avec un environnement biotique et abiotique. Les approches multidisciplinaires qui combinent mathématiques, informatique et physique ont alors un rôle central pour mieux comprendre la dynamique, l'évolution et le contrôle des systèmes vivants.

A. Les systèmes biologiques, des systèmes physiques complexes

La biologie des systèmes est profondément ancrée dans la démarche de modélisation physique, qui permet l'analyse de l'émergence des propriétés des systèmes à partir du comportement des éléments qui les constituent et des couplages entre leurs différents niveaux d'organisation. Comment les organismes vivants s'inscrivent-ils dans les lois de la physique ? Leur fonctionnement implique des processus uniques au vivant : ils se reproduisent et évoluent, ils perçoivent l'environnement en transmettant des informations au monde extérieur, ils prennent des décisions leur permettant d'interagir avec leur environnement. La contribution unique de la physique est de définir et d'intégrer des contraintes et des limites aux mécanismes possibles d'évolution des systèmes vivants, telles que les limites imposées par le bruit moléculaire, les coûts énergétiques, la diffusion, les échelles de longueur et de temps. Les systèmes vivants mettent en œuvre des solutions fiables et souvent reproductibles, et ce à toutes les échelles, des récepteurs aux voies de signalisation et circuits génétiques régulant le phénotype et la différenciation cellulaire, puis aux populations évolutives et groupes d'animaux, en passant par les tissus et les réseaux de neurones. Un des objectifs de la physique biologique théorique multi-échelles est d'aller au-delà de la simple modélisation du comportement observé mais de trouver les lois et les règles qui permettent des théories prédictives et si possible unificatrices. Une direction novatrice est la formulation des lois phénoménologiques qui cherche à extraire les variables et interactions qui gouvernent les comportements observés au lieu de modéliser chaque interaction de signalisation.

Un des défis considérables de la biophysique moderne est d'extraire les mécanismes biologiques à partir de données toujours plus volumineuses et complexes, puis de les vérifier

quantitativement au regard des données. Les interconnexions entre biophysique, statistique et apprentissage automatique sont donc extrêmement prometteuses mais constituent des défis méthodologiques majeurs (par exemple, l'interprétabilité des modèles, l'apprentissage des modèles dynamiques, la cohérence des modèles d'apprentissage avec les lois de la physique). La physique moderne du vivant utilise désormais des méthodes à l'origine développées en informatique, en théorie de l'information et en théorie de contrôle, en allant souvent plus loin dans l'interprétation pour faire un lien entre les résultats de ces approches et les mécanismes physiques. Ces potentialités se sont déjà révélées prometteuses pour l'étude de la chromatine, pour les attracteurs continus en neuroscience, l'étude des ligands immunologiques, la séparation de phase dans les tissus et la description du régime d'interférences de clones dans l'évolution. Actuellement, nous manquons de modèles bien établis en physique biologique théorique, ce qui en fait un domaine jeune et passionnant, où l'analyse statistique avancée des phénomènes observés à travers les échelles conduit à des modèles abstraits, dont les prédictions sont testées dans l'esprit de la physique.

IV. Recherche biomédicale et santé

La recherche biomédicale s'est récemment transformée grâce à l'accès facilité au séquençage et à l'imagerie à haut débit, le numérique devenant incontournable dans les systèmes de santé. La volonté de développer les techniques de e-santé et la mise en place accélérée des plateformes de séquençage au sein des hôpitaux constituent des atouts indiscutables, nécessitant cependant une réelle réflexion (notamment méthodologique) sur la mise en place de suivi longitudinal de cohortes, le stoc-

kage et l'analyse des données, et l'exploitation des résultats en clinique.

Des projets de recherche biomédicale d'envergure ont récemment émergé, comme le Plan Médecine Génomique 2025 (démarrage en 2016 avec le projet de financer 12 plateformes génomiques pour le diagnostic), ou le programme 3IA (lancé en 2019) avec sa composante santé. En imagerie, les infrastructures nationales France Life Imaging et France Bio Imaging ont été mises en place dans le cadre des Projets d'investissement d'Avenir dès 2013, avec des initiatives au niveau Européen également (European Institute for Biomedical Imaging Research). Au niveau international, de nombreux projets ou consortiums ont été lancés, certains avec participation de la France, comme le Brain Human Project, d'autres sans participation française, comme l'International Cancer Proteogenome Consortium. Tous ces projets partagent la caractéristique commune d'être interdisciplinaires et de mobiliser des expertises importantes en modélisation, analyse et gestion de données, ainsi qu'en intelligence artificielle. D'importants besoins en développements méthodologiques sont ainsi apparus afin, *in fine*, d'améliorer la compréhension de processus pathologiques mais également pour le bénéfice des patients (diagnostic, suivi thérapeutique) avec notamment l'émergence de la biologie des systèmes dans les hôpitaux.

A. Suivi de patients et médecine personnalisée

La modélisation de cohortes est un défi majeur de la recherche biomédicale translationnelle. Les études rétrospectives ont laissé la place aux études *on-line* intégrant les patients dès leur entrée dans l'hôpital. La quantité et l'hétérogénéité des données modernes de santé (séquences, signaux EEG, imagerie), ainsi que l'explosion des valeurs manquantes posent des difficultés dans la modélisation du suivi longitudinal de patients. L'apprentissage

automatique commence à investir ces questions importantes, avec des résultats prometteurs, surtout dans les pathologies utilisant l'imagerie médicale ; toutefois, cette technique souffre drastiquement du peu de données d'apprentissage disponibles, et ne permettent que peu l'interprétation des résultats, question pourtant capitale pour comprendre les mécanismes des pathologies et en tirer les informations nécessaires à la prise en charge des patients. Il est donc important de lever ces enjeux en proposant des modèles robustes, flexibles et interprétables. La conception même des études à but d'intégration de données (moléculaires, phénotypiques, signaux ou images) reste une question ouverte, ce qui nécessite la prise en compte de la disponibilité des techniques et des patients, ainsi que des coûts des expériences. Leurs analyses, reposant sur des outils de normalisation des données, sont souvent adaptées de techniques en techniques, puis intégrées dans des logiciels clés-en-main, sans réelle remise en question de leurs performances. Des approches différentes se développent, basées par exemple sur la considération d'espaces de géométrie différente, ou sur des techniques de transport optimal.

Les avancées de biologie fondamentale amènent aussi à préciser les modèles physiologiques utilisés dans les domaines biomédicaux (poumon, sang, cœur). Les modèles biomécaniques de tissus vivants ont conduit par exemple à mieux simuler les croissances cancéreuses sur la base d'images de patients, à adapter les simulations de biofluides en s'appuyant sur une reconstruction individualisée des caractéristiques physiques du patient.

B. Des systèmes pathogènes stochastiques et dynamiques

Les interactions entre sciences biomédicales et modélisation ont récemment connu de nouveaux développements permettant de mieux intégrer expérimentation biologique,

modélisation et applications médicales. Par exemple, l'étude de l'évolution du cancer a connu de nouvelles avancées grâce aux modèles mathématiques et physiques permettant de décrire et de prédire la croissance tumorale en interaction avec son environnement. Les approches de modélisation permettent désormais d'adopter une vision systémique de la tumeur en interaction avec le système immunitaire et le métabiome. Les modèles stochastiques ou à base d'équations aux dérivées partielles (au sens large) sont au cœur de la prédiction la dynamique de ces systèmes. En parallèle, les technologies d'imagerie étant de moins en moins invasives et plus précises, décrire les interactions cellulaires et identifier la répartition des contraintes et des forces dans ces systèmes dynamiques constituent un axe de recherche actif. Les théoriciens travaillent en étroite collaboration avec des expérimentateurs pour comprendre à la fois le rôle de la géométrie globale et locale, de la mécanique et l'utilisation de l'énergie dans le développement, la différenciation cellulaire, et la formation de tumeurs.

La modélisation dynamique, fondée sur des modèles d'équations différentielles ou des modèles stochastiques, est également au cœur des développements récents pour l'étude des dynamiques d'infections virales ou bactériennes. Physiciens et mathématiciens introduisent actuellement des idées issues de la théorie du contrôle et proposent des protocoles de vaccination plus efficaces et en cours de test. Dans tous ces cas, des notions avancées issues de la théorie des probabilités, de la statistique bayésienne et de la physique des événements rares sont utilisées pour aller au-delà des méthodes classiques de biologie computationnelle. Les formidables succès des modèles biophysiques, combinés au développement de nouvelles techniques d'inférence, ont montré que l'évolution globale de la grippe peut être prédite à des échelles de temps inférieures à un an. À plus grande échelle, les spécialistes des réseaux combinent différents types de données à grande échelle (contrôle des maladies, suivi des téléphones portables) pour améliorer les modèles épidémiologiques et pour aider à comprendre la

propagation de maladies. Les tendances récentes incluent des approches multi-échelles, dans lesquelles les données de séquençage sont mélangées avec des informations sociologiques. Cette recherche a des implications pratiques pour la santé publique, mais également pour les fondements mathématiques et physiques des systèmes en désordre avec des interactions.

V. Biodiversité, évolution et écologie

A. Génomique environnementale à haut débit

L'accessibilité croissante des données moléculaires à haut débit a provoqué une révolution dans l'étude de la diversité et de l'évolution des écosystèmes, avec des impacts majeurs en santé, climat, agriculture, et biodiversité par exemple. La génomique environnementale à haut débit a pour ambition d'identifier les acteurs de la biodiversité en matière d'espèces et de fonctions, en combinant données génomiques, génétiques, métaboliques, phénotypiques et données environnementales pour élucider les principes écologiques et évolutifs de base qui sous-tendent le fonctionnement d'écosystèmes complexes. Parmi les projets scientifiques à grande échelle en cours, nous pouvons citer l'exploration à l'échelle de la planète du plancton marin, qui est une composante clé du cycle du carbone et, également, l'étude du microbiote humain dont les interactions avec l'hôte sont un élément déterminant pour la santé. Cette révolution a été rendue possible grâce à la conception de structures de données spécialisées, pour indexer, interroger, fouiller, visualiser, structurer ou compresser ces masses de données. Ces avancées nécessitent une recherche algorithmique

spécifique au domaine de la bioinformatique, qui trouve ses fondements en optimisation combinatoire, recherche opérationnelle, théorie des graphes ou algorithmique. Un enjeu particulier sera la conception de structures de données probabilistes, ainsi que de nouvelles heuristiques permettant le passage à l'échelle des méthodes d'indexation et de comparaisons globales des données de séquençage. Renforcer les liens entre informatique et statistique apparaît également crucial, notamment pour déterminer la significativité des variables d'intérêt détectées par des méthodes informatiques. Ces recherches s'accompagnent de validations théoriques et pratiques, en collaboration notamment avec des océanographes comme c'est le cas par exemple dans le cadre du projet Tara Océans. Enfin, la biophysique offre des perspectives prometteuses pour explorer les contraintes et les flux énergétiques dans les communautés et expliquer les liens entre le métabolisme, l'énergie, l'écologie et l'évolution. La physique (souvent hors équilibre) et les simulations numériques peuvent ainsi proposer des expériences d'évolution quantitative dirigées par les modèles, pour extraire des propriétés émergentes et prédire l'évolution et la robustesse du système face aux forçages environnementaux.

B. Modélisation des processus évolutifs et écologiques

La disponibilité de nouvelles technologies basées sur le séquençage, ainsi que des outils de surveillance en temps réel de communautés contrôlées, ont profondément transformé les approches éco-évolutives, en soulignant le besoin de nouvelles approches théoriques. Les lois fondamentales de l'évolution sont simples : les mutations génèrent des variations, tandis que la dérive, la recombinaison, la migration et la sélection génétiques modifient les fréquences des variants. Cependant, même dans des situations très simples, il est souvent étonnamment difficile de prédire comment ces forces agissent sur des millions d'individus afin

de déterminer collectivement l'évolution d'une population. Physiciens, statisticiens et mathématiciens ont contribué de longue date en écologie-évolution (modèles de Lotka-Volterra, de populations structurées, de dérive génétique et plus récemment des apports de la théorie des matrices aléatoires). Les sciences formelles doivent désormais développer de nouveaux modèles intégrant des processus évolutifs comme la recombinaison, ainsi que des processus écologiques, pour étudier dans la dynamique d'adaptation et la structure des populations, la cohésion taxonomique et l'évolution dans des environnements fluctuants. En effet, le défi méthodologique consiste à intégrer un environnement intrinsèquement dynamique, tel que l'interaction éco-évolutive dans l'écologie microbienne, les interactions système immunitaire-pathogène ou les tumeurs. Ces approches quantitatives permettront également d'étudier le contrôle et la prévisibilité des systèmes éco-évolutifs, qui sont des processus intrinsèquement aléatoires. L'augmentation spectaculaire de la quantité de données de séquences rend les comparaisons quantitatives avec les modèles prédictifs accessibles. Là encore, l'apprentissage automatique offre des perspectives prometteuses, avec la difficulté croissante d'identifier les bons niveaux de description des relations génotypes/phénotypes complexes.

La reconstitution de l'histoire évolutive des organismes et la phylogénie sont aussi fondamentalement transformées par l'accessibilité des génomes complets de nombreux organismes. Des progrès considérables ont été accomplis ces dernières années, alimentés par de nouveaux ensembles de données de séquençage et morphométriques et de données fonctionnelles. Les progrès méthodologiques accomplis combinent de nouvelles méthodes bayésiennes, souvent associées à des modèles statistiques d'évolution. Ces méthodes ont changé notre interprétation d'histoires évolutives, comme les phylogénies bactériennes, ou macro-évolutives. De nombreux travaux ont également été consacrés à la construction de modèles statistiques de corrélations dans les séquences existantes et à la séparation des contraintes évolutives et fonc-

tionnelles. Cependant, les méthodes actuelles reposent souvent sur des phylogénies pré-assemblées, ce qui pose le défi de l'inférence phylogénétique prenant en compte la sélection, l'asymétrie de la production de descendants, les réarrangements à grande échelle, le transfert horizontal de gènes, les environnements variables et/ou structurés, y compris par exemple les taux élevés d'extinction-recolonisation de patches ou d'hôtes dans le cas des micro-parasites. Cependant, des travaux récents, combinant de grandes quantités de données et l'apprentissage automatique, proposent de nouvelles méthodes d'inférence, offrant de nouvelles perspectives au domaine.

VI. Biologie structurale et chimie du vivant

A. Intégration multi-échelle des phénomènes moléculaires

La biologie structurale a poursuivi ces dernières années le mouvement vers la biologie intégrative, qui tend à englober la description moléculaire des objets biologiques de l'échelle mésoscopique à l'échelle cellulaire. Cette tendance de fond implique, pour les aspects de modélisation moléculaire, le développement de modèles physiques permettant de prendre en compte simultanément plusieurs niveaux de détails dans la modélisation : tout-atome, gros-grains, ainsi que différents niveaux de modélisation quantique, qui aujourd'hui permettent non seulement de traiter la réactivité enzymatique mais aussi de décrire les phénomènes de photo-biologie. En parallèle, la démocratisation des architectures avec GPU donne accès à des temps de simulation et à des niveaux de théorie inimaginables il y a 5 ans.

La disponibilité de ces nouvelles ressources de calcul pose d'abord des défis informatiques

d'efficacité pour les codes de modélisation moléculaire. Ces nouvelles ressources permettent l'accès à des durées de simulation de dynamiques moléculaires qui atteignent désormais de la micro-seconde jusqu'à la milliseconde (suivant la dimension des systèmes modélisés). La taille des systèmes étudiés peut maintenant aller jusqu'à un petit organisme (comme par exemple, un virion de 800 millions d'atomes). Par ailleurs, l'accroissement de la puissance de calcul induit un problème de taille des données, aussi rencontré dans les acquisitions de données cryo-EM (la taille d'un jeu de données étant de l'ordre du téraoctet). Des approches doivent être développées pour prendre en compte ces problèmes, en passant par des méthodes d'automatisation basées sur des analyses statistiques.

Le défi est de trouver le meilleur compromis entre la simulation de systèmes de plus en plus gros et la sophistication des modèles physiques de description des systèmes. Les deux aspects se complètent, car le paradigme basé sur des champs de force classiques utilisé jusqu'à présent nécessite d'être amélioré, par exemple pour prendre en compte la description fine des effets du pH et de la solvation couplés avec les effets de la polarisation de l'environnement (champ de force polarisable). Ceci pourra notamment permettre un traitement plus réaliste des phénomènes de transfert de charge et d'énergie (photosynthèse, respiration cellulaire), des modifications post-traductionnelles, ou alors la modélisation fine des échanges de protons pour les biomolécules avec la participation du solvant. Il s'agit là d'aspects qui sont cruciaux pour la description des processus cellulaires et physiologiques. Enfin, la simulation simultanée de modèles physiques avec différents niveaux d'approximation pose le problème du développement de théories physiques permettant de modéliser les interfaces entre ces niveaux, ainsi que l'interface entre les échelles moléculaire ou gros-grain et la description mésoscopique qui pourront se nourrir d'un dialogue plus poussé.

B. Approches multidisciplinaires pour la modélisation et la simulation moléculaires

Les verrous expérimentaux entre différents domaines qui relevaient des aspects moléculaires ou cellulaires sont progressivement levés. La multidisciplinarité induite par cette évolution pose le problème de la prise en compte dans les calculs reliés à la biologie structurale et moléculaire de données hétérogènes. Cette hétérogénéité provient de la diversité des méthodes utilisées aussi bien que de la complexité des phénomènes moléculaires sous-jacents aux processus physiologiques et cellulaires. Le désordre conformationnel d'un nombre de plus en plus grand de régions des protéines étudiées, ou l'hétérogénéité conformationnelle de la chromatine responsable en partie des difficultés d'analyse statistique des données de conformation en sont un exemple emblématique. La prise en compte de l'hétérogénéité des données nécessite le développement d'approches statistiques permettant d'appréhender cette diversité des données et des technologies. Dans ce sens, les approches fondées sur l'apprentissage automatique semblent constituer une piste prometteuse, et leur généralisation à l'analyse des trajectoires de dynamique moléculaire serait à envisager. L'introduction des approches bayésiennes pour l'ajustement de structures aux données expérimentales de biologie structurale sera certainement poursuivie et étendue à de nouveaux domaines, comme la tomographie aux rayons X ou bien la modélisation *ex novo* de structures de biomolécules ainsi qu'aux méthodes hybrides. De plus, un nouveau champ d'action pour les approches bayésiennes est représenté par la prise en compte de la dynamique interne des objets moléculaires.

Quant aux interactions entre macromolécules biologiques et ligands, la croissance de la puissance de calcul combinée à l'amélioration des méthodes d'échantillonnage permettent l'intégration des méthodes de scores des

poses d'amarrage (docking) et des outils de modélisation moléculaire basés sur l'échantillonnage augmenté. De plus, les développements poussés des méthodes d'énergie libre ont pour but de prendre en compte la complexité de la définition des variables collectives dans les systèmes de complexité croissante, pour intégrer des stratégies basées sur les forces de biais et la méta-dynamique. Dans ce sens, la géométrie différentielle stochastique (provenant des mathématiques fondamentales) fournit des outils précieux pour la compréhension et la conception des méthodes d'échantillonnage augmenté.

Le développement de méthodes statistique de scores « ligand-based » pourra se baser sur les jeux d'apprentissage formés de mesures réalisées dans des conditions hétérogènes, afin de proposer des outils robustes. Une piste prometteuse pour améliorer les descripteurs des ligands est d'utiliser les avancées des méthodes de chimie quantique.

Enfin, il est absolument indispensable que la puissance de calcul disponible dans les centres de calcul nationaux ainsi que dans les laboratoires rattrape la progression actuellement observée dans les autres pays industrialisés, afin de ne pas faire subir un déclassement à l'ensemble de la communauté des bio-informaticiens en France. Dans ce cadre, si la proposition de la création de « data centers », considérée comme une priorité gouvernementale, est à saluer dans la mesure où elle peut pousser à l'augmentation des ressources de calcul, elle devra aussi être suffisamment flexible pour permettre une utilisation et exploitation optimales aux acteurs de la modélisation moléculaire et cellulaire. En sens complémentaire, les équipes interdisciplinaires dédiées à la modélisation moléculaire doivent pouvoir intégrer pleinement les opportunités offertes par la priorité stratégique donnée à l'intelligence artificielle.

VII. Neurosciences computationnelles

L'un des grands défis que doivent encore relever les neurosciences consiste à générer une compréhension non seulement quantitative, mais également fonctionnelle, voire algorithmique, des comportements émergents du système nerveux, de la sensation à l'action, en passant par la décision ou la mémoire. Parmi les caractéristiques encore mal comprises figurent notre capacité à percevoir, interpréter, apprendre et prédire le monde qui nous entoure, à créer des souvenirs qui peuvent durer toute une vie et à prendre des décisions qui nous rapprochent de la réalisation de nos objectifs. La cognition et le comportement sont la propriété émergente de l'activité de réseaux contenant des milliards de neurones, alors que nous commençons tout juste à comprendre les propriétés de calcul collectif de centaines de neurones, grâce à des techniques expérimentales de pointe associées à des approches informatiques et théoriques qui rassemblent des méthodes issues des statistiques, mathématiques, physique, imagerie et informatique. Ces problèmes doivent être étudiés à plusieurs échelles – des cellules et circuits simples jusqu'à la cognition et au comportement.

A. Multiples échelles spatiales et temporelles

L'un des défis principaux pour les neurosciences computationnelles est celui du passage à l'échelle, depuis le monde microscopique des molécules, neurotransmetteurs, dendrites et synapses vers le monde macroscopique des populations de neurones, des aires cérébrales ou des cerveaux et organismes entiers. Des modèles mathématiques du comportement d'un ou plusieurs neurones connecté(s) existent déjà, mais ne peuvent pas rendre compte de fonctions cognitives complexes.

Les limites de champs moyens ont commencé à permettre de modéliser les assemblées de neurones sur la base du comportement physiologique d'un neurone. L'enjeu est de pouvoir extrapoler leur comportement au niveau d'une population, voire de plusieurs populations neuronales inter-connectées. De nouveaux outils mathématiques sont donc nécessaires, s'inspirant des modèles stochastiques ou des approximations de champ moyen. Ces outils méthodologiques sont d'autant plus nécessaires, et d'autant plus sophistiqués, que les techniques expérimentales d'où provient l'information biologique accroissent leur résolution et atteignent de très hauts débits (par exemple, enregistrements multi-électrodes, imagerie bi-photonique).

La question du passage à l'échelle concerne également les aspects temporels, avec à la fois des mécanismes de signalisation rapide (de l'ordre de la milliseconde) et des réponses électrophysiologiques plus lentes (plusieurs dixièmes de seconde), jusqu'à des fonctions cognitives s'exprimant sur une ou plusieurs secondes, et des processus de mémorisation à plus ou moins long terme, pouvant durer toute une vie. Le cerveau étant un système adaptatif par excellence, ces dynamiques temporelles et leur évolution sont souvent anticipées ou prédites au sein du système lui-même, donnant lieu à une représentation dynamique de l'environnement interne comme externe. Quels sont les algorithmes de calcul de la réponse et de son adaptation, quel est le traitement du signal dans ces conditions changeantes, souvent aléatoires? À la plus large comme à la plus petite échelle spatiale et temporelle, des théories efficaces, basées sur des approches de physique statistique et des modèles mathématiques probabilistes (par exemple les approches bayésiennes, théorie d'information, modèles de dynamique stochastique non-linéaires, théorie du contrôle, inférence statistique), permettent de relier l'échelle fonctionnelle à des résultats vérifiables expérimentalement. La physique a également apporté des idées sur le codage de la mémoire dans des attracteurs tant discrets que continus. Les dernières années ont montré pour la première fois, avec l'aide de la théorie pour diriger et analyser les expériences.

ces, la preuve expérimentale d'attracteurs continus. Une exploration plus poussée dans d'autres domaines, ainsi que la compréhension de leur codage et de leurs conséquences, ouvrent de nouveaux horizons aux systèmes dynamiques en neurosciences.

B. Des neurosciences computationnelles à l'intelligence artificielle

Notre capacité de modélisation du système nerveux croît en proportion directe avec les progrès en informatique, que ce soit au niveau matériel (e.g. processeurs graphiques), logiciel ou algorithmique. L'essor (ou le renouveau récent) de l'Intelligence Artificielle (IA) est à la fois moteur pour la modélisation en biologie, et l'un des premiers domaines d'application des découvertes en neurosciences computationnelles. L'apprentissage automatique offre des méthodes de plus en plus puissantes pour capturer, reproduire et modéliser des observations expérimentales de plus en plus détaillées (e.g. imagerie microscopique, électrophysiologie, imagerie cérébrale fonctionnelle). D'autre part, certains modèles d'intelligence artificielle (notamment ceux basés sur les réseaux de neurones profonds) peuvent être compris et analysés en tant que nouveaux systèmes "intelligents", et donner lieu à de nouvelles théories du traitement de l'information dans le cerveau, qu'il conviendra ensuite de valider expérimentalement. Enfin, les progrès théoriques réalisés dans l'étude du cerveau peuvent servir en retour à alimenter la recherche en IA : c'est ainsi que l'inspiration des neurosciences a permis d'établir les premiers modèles de réseaux de neurones il y a près de 50 ans, et ouvert la voie au "deep learning" actuel. De la même manière, les neurosciences computationnelles d'aujourd'hui doivent permettre l'émergence de nouvelles architectures de réseaux de neurones, de nouvelles méthodes de codage neuronal ou d'apprentissage automatique pour l'IA de demain. Un défi important pour les années à venir serait

de pouvoir tirer parti des logiciels de différenciation automatique issus de l'IA (comme TensorFlow et PyTorch) pour les approches de neurosciences computationnelles.

C. Imagerie cérébrale et traitement du signal

Les progrès des méthodes expérimentales en anatomie ou électrophysiologie (nouvelles imageries microscopiques, imagerie multimodale, multi-échelle sur des grands volumes, définition de nouveaux contrastes) s'accompagnent de besoins toujours croissants en traitements du signal, traitements d'images, segmentation et reconstruction d'images, y compris pour la résolution de problèmes inverses (retrouver les causes d'un signal multidimensionnel, en reconstruire les sources, etc.). Dans le domaine de l'imagerie cérébrale, la notion de "connectome" fait référence à une description multi-échelles des populations neuronales et de leurs interactions, souvent manifestées par des connexions ou faisceaux de connexions axonales. L'analyse de ce nouveau genre de données massives requiert des techniques avancées pour le traitement de signal sur graphes. De manière générale, diverses méthodes statistiques (par exemple, réduction de dimension, modèles parcimonieux, techniques d'inférence Bayésienne) sont nécessaires pour répondre aux enjeux du "big data". Là aussi, les méthodes d'apprentissage automatique en général et de Deep Learning en particulier apportent de nouvelles solutions plus appropriées aux données massives. Un exemple est la parution récente de diverses méthodes de segmentation automatique de neurones, axones ou dendrites en imagerie calcique et biphotonique basées sur des réseaux convolutionnels profonds. Ces problématiques posent également la question de la constitution, de la gestion et du partage de grandes bases de données d'imagerie, déjà abordée précédemment.

D. Comportements et intelligences collectives

Enfin, le comportement peut être étudié sans passer à l'échelle du neurone (voire même pour des systèmes non-neuronaux, tels que des bactéries). On peut prendre pour exemple les mouvements collectifs de bancs de poissons ou de volées d'oiseaux, ainsi que l'intelligence distribuée de certains insectes "sociaux", telles les fourmis. Ces systèmes comportementaux ont été utilisés pour proposer des algorithmes de recherche et explorer le rôle des a priori codés, de la mémoire et de la détection. Les modèles récents de comportement collectif, fondés sur des données expérimentales, nous ont aidé à comprendre le rôle des interactions dans les systèmes dynamiques et à quantifier le mouvement complexe. Pour aller plus loin, il conviendra de combiner des modèles d'environnement (e.g. environnements turbulents), des expériences quantitatives ainsi que des théories sur l'orientation et la prévision dans les environnements stochastiques (rôle de l'apprentissage, rôle de la perception).

VIII. Recommandations

A. Ingénieurs, chercheurs, plateformes, structures nationales

La recherche méthodologique en modélisation pour la biologie se nourrit de l'interface entre les acteurs des sciences du vivant et les méthodologistes. Les plateformes de bioinformatique regroupées au sein de l'Institut Français de Bioinformatique (IFB) ont un rôle stratégique car elles assurent cette activité translationnelle. Elles permettent le transfert

de l'expertise acquise sur la manipulation et l'annotation des données biologiques (étape cruciale pour toute méthode d'apprentissage notamment). L'activité du chercheur interdisciplinaire doit s'appuyer sur le support d'ingénieurs et techniciens en informatique et analyse des données. Ces besoins concernent la maintenance et le fonctionnement d'infrastructures informatiques (centres de calcul, serveurs, bases de données) mais également un travail d'ingénierie logicielle (et de maintenance à long terme), afin de rendre disponibles et accessibles les développements méthodologiques réalisés par les chercheurs (interfaces homme-machine, GUI), dans un contexte où les FAIR data (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) doivent devenir un standard. Par conséquent les recrutements d'ingénieurs et techniciens doivent se faire en cohérence avec ceux des chercheurs interdisciplinaires.

En plus de structures dédiées aux interfaces biologie/modélisation, il est absolument indispensable que la puissance de calcul disponible dans les centres de calcul nationaux ainsi que dans les laboratoires rattrape la progression actuellement observée dans les autres pays industrialisés. Dans ce cadre si la proposition de la création des «data centers», considérée comme une priorité gouvernementale, est à saluer dans la mesure où elle peut pousser à l'augmentation des ressources de calcul, elle devra aussi être suffisamment flexible pour permettre une utilisation et exploitation optimale aux acteurs de la modélisation moléculaire et cellulaire. À ce titre les infrastructures nationales doivent être soutenues (TIMES, GENCI, CC-IN2P3, France Grilles, IFB), et les efforts nationaux doivent être coordonnés, notamment pour que les chercheurs français puissent mieux se positionner au sein de projets internationaux. Par ailleurs, les serveurs et centres de calcul induisent un coût énergétique/environnemental qui croît avec la masse des données. Il serait donc intéressant que les utilisateurs de ces structures aux interfaces avec la biologie entament une réflexion sur ces aspects.

Aussi, le CNRS doit renforcer les outils de valorisation et de soutien juridique aux chercheurs impliqués dans des recherches interdisciplinaires, notamment translationnelles. Ce soutien doit aussi s'accompagner d'une réflexion concernant l'impact des recherches et les responsabilités éthiques et morales des chercheuses et chercheurs aux interfaces biologie-modélisation, notamment en lien avec l'importance croissante des méthodes d'intelligence artificielle en biologie.

Enfin, l'animation scientifique de ces communautés s'articule autour de Groupements de Recherche interdisciplinaires qu'il est nécessaire de continuer à soutenir (comme les GDR BIM, Madics, IRN PAN, CellTiss, IAEM, IA, Médyna, MAMOV).

B. Rassembler l'interdisciplinarité dans une unité de lieu

Le paysage français inclut quelques équipes de recherches et des plateformes interconnectées, mais la concurrence internationale est extrême dans ce domaine : plusieurs pays (USA, UK, Pays Bas) ont adopté de longue date une stratégie de structures intégrées rassemblant les différents acteurs de la recherche interdisciplinaires en biologie comme en santé. Promouvoir la constitution d'équipes interdisciplinaires (dans les laboratoires de biologie ou dans les laboratoires de mathématiques, informatique ou de physique) semble crucial pour développer une recherche interdisciplinaire ayant une visibilité internationale. Mais il faut trouver un équilibre entre quelques équipes pointues à effectif limité, et des centres de recherche dédiés à l'interdisciplinarité, qui sur le long terme ont la masse critique suffisante pour insuffler une vraie dynamique de recherche aux interfaces. La structuration du CNRS en instituts dont les chercheurs dépendent exclusivement apparaît comme une difficulté à la constitution d'équipes de recherches interdisciplinaires. Une réflexion est à mener pour

proposer des structures plus souples, au sein desquelles les chercheurs pourraient être recrutés sans contrainte d'appartenance à tel ou tel institut. Cette souplesse doit aussi concerner la formation doctorale en permettant aux étudiants de développer leur projet au sein de structures transverses.

C. Renforcer la CID 51, pivot de la multidisciplinarité au CNRS

La CID 51 est un outil stratégique pour le CNRS, car elle permet de recruter et d'évaluer des chercheurs de haut niveau aux interfaces. La constitution de jurys dédiés, composés à la fois de méthodologistes et de biologistes, doit absolument être maintenue car l'interdisciplinarité nécessite une inspection et une évaluation spécifiques des dossiers. Cela permet au CNRS de recruter des profils atypiques, d'un excellent niveau, qui n'auraient pas été sélectionnés par une section disciplinaire (par exemple des candidats ayant changé de thématiques dans leur parcours, ou dont le projet aux interfaces aura plus de difficulté à être évalué par une section disciplinaire). Un des objectifs de la création de la première CID biologie-modélisation était de constituer une communauté de chercheuses et chercheurs aux interfaces. L'initiative, conçue comme étant ponctuelle et limitée dans le temps au départ, s'est avérée être un formidable outil de développement de l'interdisciplinarité au CNRS. Une véritable communauté de chercheurs est constituée, ce qui s'illustre par l'abondance des GDR consacrés à la modélisation (au sens large) en biologie et par la constitution d'équipes de recherche reconnues internationalement sur ce thème, dans différents instituts du CNRS.

Pourquoi maintenir une CID dans ce contexte ? Au vu de l'évolution de la biologie en tant que science de plus en plus quantitative, et de l'évolution des sciences de la modélisation d'autre part, la CID 51 doit être maintenue et renforcée pour accompagner les transformations des interactions biologique-

modélisation. En effet, à l'inconnu inhérent aux découvertes disciplinaires s'ajoute l'inattendu des potentielles interactions entre disciplines. Nous pensons que cette véritable interdisciplinarité nécessite des structures particulières. Le statut de CID permet de rassembler plusieurs instituts autour d'une même politique scientifique de recrutements, ce qui est unique et précieux. Ce statut pourrait être réformé en termes de fonctionnement et de prérogatives. Concernant le fonctionnement, les modalités de recrutement des membres élus des CID apparaissent inadaptées alors que les mandats durent 5 ans : les membres des sections disciplinaires siégeant en CID participent à deux concours, ce qui représente un investissement déraisonnable sur une période aussi longue, ayant pour conséquence une difficulté à trouver des

volontaires (et donc des experts). Concernant les prérogatives, la spécificité du recrutement et de l'évaluation par les CID doit pouvoir s'étendre à la promotion des chercheurs hors-classe et des directeurs de recherche 1^{re} classe. En effet, l'intérêt pour l'interdisciplinarité peut se manifester tout au long de la carrière, et il nous semble essentiel de promouvoir des DR1 ayant un profil interdisciplinaire, et qui auraient eux aussi opéré des changements thématiques ou acquis des compétences fortes dans un domaine autre que celui de leur expertise initiale. Enfin, pour promouvoir l'interdisciplinarité au CNRS, il semblerait judicieux que la CID 51 puisse proposer des médailles de bronze et des primes (PEDR) au titre de la recherche interdisciplinaire.

ENVIRONNEMENTS SOCIÉTÉS : DU FONDAMENTAL À L'OPÉRATIONNEL

Composition de la commission interdisciplinaire – CID

Catherine LEBLANC (présidente de la commission), Enguerran MACIA (secrétaire scientifique), Luc ABBADIE, Vincent BELS, David BIRON, Sophie CAILLON, Marie CHARPENTIER, Étienne COSSART, Étienne DELOULE, Élise DEMEULENAERE, Hervé DOREAU, Magali DREYFUS, Bernard DUSSOUBS, Didier GALOP, Romain GARCIER, Alain QUEFFELEC, Ginette SARACCO, Téléphore SIME-NGANDO, Thierry TATONI, Konstantinos TERMENTZIDIS.

Résumé

À l'heure du changement climatique et de la crise de la biodiversité, les recherches dans le domaine de l'environnement sont devenues cruciales. Considérant la notion d'environnement comme intrinsèquement dynamique et englobante, la commission interdisciplinaire « Environnements sociétés : du fondamental à l'opérationnel » (CID 52) propose ici une vision synthétique des thématiques développées dans ce champ. Fondées sur la mise en œuvre de l'interdisciplinarité (et sa variabilité, inhérente à chaque objet d'étude), ces recherches s'articulent autour de trois piliers : l'analyse de la complexité structurelle et fonctionnelle des socio-écosystèmes ; une interaction forte avec la société ; l'innovation au service de la gestion et la préservation de l'environnement *sensu largo*.

Forte d'une dizaine d'années d'existence, la CID 52 a pu constater le dynamisme de ce champ de recherche ainsi que son exemplarité en termes de croisement des savoirs. Maintenir et renforcer ces recherches aux interfaces constitue une priorité dans le contexte actuel et doit bénéficier d'un soutien à la hauteur des enjeux.

Introduction

La commission interdisciplinaire « Environnements sociétés : du fondamental à l'opérationnel », ou CID 52, a été créée en 2012. En prenant la suite de la CID 45 « Dynamique des systèmes environnementaux,

développement durable, santé et société» (2008 – 2011), la CID 52 a poursuivi son investissement en faveur de la recherche interdisciplinaire à l'interface entre environnement et sociétés.

Dans un premier temps, il semble essentiel de rappeler la lecture que nous faisons de l'environnement au sein de la CID 52, qui rassemble des scientifiques d'horizons très divers, allant des sciences de la vie et de la terre aux sciences humaines et sociales. L'environnement, pris au sens large, est une notion intrinsèquement dynamique, temporellement comme spatialement, englobant l'ensemble du vivant (et donc, de fait, les sociétés humaines). Pour la CID 52, l'environnement se caractérise par les trois propriétés suivantes :

- des changements de qualité du milieu de vie (physique, chimique, biologique, écologique et social) ;

- des changements, liés aux activités humaines, impactant le fonctionnement des écosystèmes, des socio-écosystèmes (incluant les sociétés humaines et non-humaines) ;

- des perspectives de conservation et/ou de remédiation environnementale.

Découlant de cette acception, les fondements de la recherche en environnement s'inscrivent dans des démarches scientifiques visant :

- (i) l'exploration, l'analyse et la compréhension de la complexité des systèmes écologiques et de leur fonctionnement, mais aussi des ressorts socio-politiques sous-jacents aux questions environnementales et leurs articulations ;

- (ii) la sensibilisation et/ou l'implication d'autres publics que la seule communauté de recherche d'origine des chercheur.e.s à ces problématiques de recherche : chercheur.e.s d'autres disciplines, société civile organisée, décideurs politiques, « grand public » ;

- (iii) la proposition de solutions, d'innovations conceptuelles, technologiques, ou socio-politiques pour la gestion et la préservation de l'environnement *sensu largo*.

Si les projets scientifiques entrant dans le champ de la CID 52 peuvent ne pas intégrer ces trois volets, ils doivent s'ancrer dans une problématique environnementale et s'inscrire, de façon directe ou indirecte, dans des perspectives de conservation, d'action ou de remédiation. La CID 52 couvre en effet des domaines de recherche très divers, qui se déploient à différentes échelles de temps et d'espace, sur un continuum allant de questionnements fondamentaux ou théoriques à des recherches résolument tournées vers l'opérationnel.

L'autre pierre angulaire de la CID 52 est la mise en œuvre de l'interdisciplinarité dans les pratiques de recherche. C'est en effet une approche propice pour aborder de façon novatrice la complexité des problématiques environnementales. L'interdisciplinarité est régulièrement discutée au sein de la CID 52 car sa mise en œuvre dans le champ environnemental nécessite des ajustements continus. Elle se fonde sur l'application de méthodes disciplinaires à des champs de recherche extérieurs à cette discipline, sur la combinaison de données issues des sciences de la terre, de la nature et de la société (quantitatives et qualitatives), de regards et méthodes venues de disciplines différentes pour saisir un même objet de recherche. Elle peut aboutir aussi à des formes plus radicales d'interpénétration des concepts, des savoirs et des méthodes. L'interdisciplinarité telle que nous l'envisageons ouvre le champ des possibles en permettant des innovations scientifiques, à la fois sur le plan conceptuel et méthodologique, et un ancrage dans l'opérationnalité. Dans ce contexte, la CID est particulièrement attentive aux démarches de recherche originales sur l'environnement, qui ne trouvent pas toujours de place dans les sections disciplinaires.

I. Les thématiques scientifiques au cœur de la CID 52 et leur évolution

Dans cette première partie, les grandes thématiques scientifiques de la CID 52 sont regroupées en trois chapitres distincts, construits autour des mots-clés qui définissent les contours de la commission. D'autres thèmes plus transverses irriguent également l'ensemble, tels que l'écologie de la santé ou l'écologie globale.

A. Changements planétaires et transition écologique

1. Changements planétaires

L'histoire de la Terre montre que le changement est une des propriétés fondamentales de la Planète, qu'il soit lié à des causes internes telles que la convection mantellique, la tectonique des plaques ou les éruptions volcaniques majeures, ou à des causes externes telles que les impacts de météorites, l'activité solaire ou la position de la terre par rapport au soleil. Ces changements, qui peuvent affecter la Terre en profondeur, se traduisent par une évolution permanente du climat, des grands cycles biogéochimiques et des conditions de vie à la surface de la planète, auxquelles se sont adaptés les organismes vivants au cours de l'évolution. Ce qui est cependant nouveau, c'est l'ampleur et la vitesse de ce changement. C'est aussi son origine, quasi exclusivement humaine, au point de constituer pour beaucoup de chercheurs une période géologique nouvelle : l'Anthropocène. Au point également de remettre en cause les équilibres environnementaux et la trajectoire de développement économique et sociale dominante et de poser, dans l'urgence, le défi de la construction d'alternatives écologiquement durables et socialement responsables.

Même si certaines composantes du changement sont identifiées depuis longtemps, voire quantifiées, il demeure un important travail d'observation, d'analyses et de modélisation à accomplir pour préciser leur dynamique et leur évolution, les régionaliser et en réduire les incertitudes – points cruciaux pour l'identification de phénomènes d'adaptation et/ou la mise au point de stratégies pertinentes d'atténuation. C'est dans ce cadre que sont menés de nombreux travaux sur la chimie de l'atmosphère, le climat, l'usage des terres ou les stratégies énergétiques. D'autres composantes sont aujourd'hui mal connues, comme les cycles biogéochimiques des polluants métalliques, organiques (dont les perturbateurs endocriniens) ou autres polluants issus de rejets anthropiques (plastique par exemple). Il existe un grand besoin de quantification et d'identification des effets des perturbations environnementales sur la dynamique et la santé des organismes et des écosystèmes, notamment dans des environnements concentrant une forte densité de population humaine (zones urbaines, milieux marins côtiers, etc.). De vastes territoires restent encore à explorer, tels que les océans, les zones de transition (continuum terre-mer, montagnes, etc.). La question des réponses, de l'adaptation et de l'évolution de ces écosystèmes aux forçages anthropiques, climatiques et chimiques reste ouverte. Au-delà des gains de connaissances que l'on peut attendre des recherches qui seront menées sur ces aspects, ces thématiques interrogent notre capacité à caractériser des trajectoires, identifier des solutions (concepts de « science based » et/ou « nature-based » solutions) et formaliser des modes de gestion environnementale ou de développement alternatifs qui émergeront d'expérimentations concrètes.

Certains des changements physiques, chimiques et biologiques planétaires en cours sont initiés ou déterminés par les changements sociaux et ont un impact fort sur ces derniers. Expliciter les liens entre les diverses catégories de changements est aujourd'hui un enjeu scientifique majeur. Le maintien d'un effort de recherche conséquent sur les composantes du changement environnemental demeure une exigence forte, qui doit passer par le dévelop-

pement d'une science des socio-écosystèmes. L'enjeu se situe au niveau des connaissances bien entendu, mais aussi au niveau opérationnel. Deux grandes directions semblent à suivre. D'une part il conviendrait de renforcer la recherche sur la dynamique des pratiques et des valeurs socio-écologiques qui régissent les interactions entre les populations humaines et les écosystèmes dans lesquels elles évoluent, notamment en ce qui concerne les ressources énergétiques, alimentaires et matérielles, mais aussi culturelles. Il y a là nécessité de favoriser les approches comparatives, dans l'espace et dans le temps, de groupes socio-culturels variés et d'écosystèmes contrastés, afin de mieux documenter l'impact des modes de vie de chacun sur l'environnement physique, la biodiversité, l'évolution et le fonctionnement des écosystèmes (mais également l'inverse). Comment ces changements modifient-ils les sociétés humaines et leur fonctionnement? Comment ces sociétés les prennent-elles en compte dans leurs systèmes de valeurs, leurs savoirs et leurs pratiques? D'autre part, le développement d'une écologie intégrative, globale, qui traite des interactions entre les grandes crises, et qui intègre tous les composants fonctionnels des écosystèmes est indispensable. En ce domaine, il existe encore un déficit criant de connaissances sur les rétroactions de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes sur le changement climatique.

En somme, analyser les problèmes d'environnement revient à démêler la logique et les dynamiques de la complexité; agir sur l'environnement, c'est intervenir sur cette même complexité. La science de la complexité socio-écosystémique a besoin d'outils puissants de modélisation en tant qu'outils d'exploration théorique, de simulation des systèmes écologiques et environnementaux, et de prédiction et de scénarisation de trajectoires; ces derniers présentant également une grande valeur en matière d'aide à la décision. Ces approches en modélisation ne pourront cependant pas s'affranchir d'une recherche active de terrain sur le long terme, avec des regards disciplinaires croisés, ancrés dans les sciences de l'environnement, et des approches innovantes pouvant impliquer aussi des non-scientifiques

(recherches et sciences participatives). Dans ce contexte, les zones ateliers (ZA) ou les Observatoires Hommes-Milieu (OHM) offrent d'excellents outils pérennes d'observation à long terme, mais aussi d'expérimentation locale. La recherche a en effet besoin d'expérimenter. Des efforts importants ont été consentis par le CNRS au cours des dernières décennies, en particulier en ce qui concerne les systèmes écologiques. La France a ainsi la capacité à se maintenir dans le peloton de tête des nations qui investissent dans l'écologie expérimentale mais cela suppose de maintenir des moyens humains techniques suffisants.

2. Transitions et stratégies de développement durable

Les sciences de l'environnement sont aujourd'hui au cœur de l'enjeu majeur du XXI^e siècle, celui de la transition écologique, que l'on peut résumer de la façon suivante: comment subvenir, de manière satisfaisante, aux besoins de plus de sept milliards d'êtres humains tout en respectant l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes et leurs capacités d'adaptation et d'évolution à plus ou moins long terme? Ces besoins s'expriment en termes d'alimentation, d'énergie, de bien-être et de sécurité, bref... de développement durable.

Dans cette perspective, de nouvelles manières de faire de la recherche doivent venir compléter le gradient d'approches existantes. Le défi consiste à veiller à l'interpénétration des résultats de la recherche en sciences de la vie et de la terre avec ceux des sciences humaines et sociales car la transition écologique ne peut dissocier l'environnement physique, chimique et biologique (et ses changements au cours du temps, dans différents lieux et à différentes échelles) des sociétés humaines. Il s'agit de maximiser l'impact des avancées scientifiques sur la construction de stratégies et d'outils de transition innovants et pertinents, construits à partir d'une vision systémique et évolutive de l'environnement et de ses composants. L'enjeu de la valorisation de la

science vers l'action et l'opérationnel se joue à l'évidence sur les problématiques portées par l'ingénierie écologique, la chimie durable, l'agroécologie, le développement des énergies renouvelables, etc. Mais, à côté de ces secteurs techniques ou technologiques à fort potentiel, d'autres domaines sont en développement rapide au niveau international et ne bénéficient en France que d'un soutien insuffisant. C'est par exemple le cas des travaux en écologie politique, en économie écologique ou philosophie environnementale, mais aussi le développement des sciences participatives en tant que manifestation de l'émergence d'une (éco-)citoyenneté nouvelle, de l'éthique du vivant ou de la justice environnementale, en tant que fondements du développement durable.

B. Socio-écosystèmes, ressources naturelles et régulations

1. Socio-écosystèmes : fonctions et services, régulation et gestion, du local au global

La démarche socio-écosystémique a progressivement gagné en robustesse et en popularité depuis sa formalisation au début des années 2000. Elle repose sur quatre piliers, qui constituent autant d'entrées dans les problématiques environnementales :

- un modèle des relations sociétés-environnement, fondé sur la notion d'interactions et de rétroactions ;

- une grammaire conceptuelle articulée autour de la notion de systèmes complexes et de leurs attributs (résilience, émergence, jeux d'échelles et de temps, institutions, gouvernance, communs, etc.) ;

- des outils analytiques à la fois plastiques et puissants, provenant tant des sciences sociales que des sciences de la terre et de la nature ;

- une base pour des discussions et des recherches intrinsèquement interdisciplinaires.

La diversité des origines disciplinaires de ces recherches est frappante, puisque peuvent être concernées aussi bien la géochimie, la chimie, l'écologie, la géographie, la biologie de la conservation, l'éthologie, la sociologie, l'anthropologie, l'histoire, le droit, l'économie ou la philosophie.

Cette démarche socio-écosystémique a été soutenue par le CNRS, avec la création des Observatoires Hommes-Milieus (OHM), qui permettent le suivi de socio-écosystèmes sur le temps long, en intégrant différentes échelles. La CID 52, ces dernières années, a vu apparaître et se renforcer des recherches qui se réclament ouvertement des approches socio-écosystémiques ou qui ont tiré parti des ressources de recherche offertes par les OHM.

Les approches socio-écosystémiques ne constituent pas l'unique manière de concevoir l'interdisciplinarité en matière d'environnement mais elles apportent un fort potentiel d'innovation. Cette innovation peut être technique avec le développement de nouvelles méthodes de mesures ou de traitement des données, mais doit aussi être réflexive dans la manière d'appréhender le système dans sa complexité et de poser des questions sous un angle nouveau. Pour favoriser l'émergence d'innovations plurielles, il importe pour les communautés de recherche concernées :

- 1° de réfléchir à la structuration spatiale et aux propriétés des systèmes : sources de données, échelles, flux, circulations, seuils ;

- 2° de faire de la science des socio-écosystèmes une source de transformations socio-écologiques : régulation et dimension normative, approches politiques, dimension critique ;

- 3° d'élargir le panel des approches en sciences humaines : éthique, imaginaires, esthétique, etc. ;

- 4° d'impliquer les non-scientifiques dans le processus d'élaboration des projets : co-construction et démarches participatives.

2. Ressources naturelles : prospective et usages par les sociétés

L'accélération actuelle de l'usage des ressources naturelles constitue une singularité à l'échelle historique : elle est constitutive de l'entrée dans l'Anthropocène car le moteur s'en trouve moins dans la démographie que dans le mode de développement des sociétés humaines, marqué par l'expansion du capitalisme consumériste à de nouveaux espaces et à des nouvelles populations.

Du point de vue scientifique, l'analyse des ressources naturelles s'en trouve transformée. Tout d'abord, l'ampleur des phénomènes observés est sans équivalent. Tous les types de ressources sont concernés : les ressources énergétiques, minérales, vivantes, l'espace même (via l'artificialisation des sols). Deuxièmement, les chercheur.e.s mettent progressivement en évidence l'interconnexion entre l'usage des ressources, l'altération des équilibres environnementaux (effondrement de la biodiversité, destruction ou fragmentation d'habitats, migrations écologiques, maladies émergentes, imprégnation des sols, des organismes et des écosystèmes terrestres et marins par les pesticides et les polluants, etc.), et la modification des grands cycles biogéochimiques (émissions de CO₂, changements climatiques, pollutions multiples). Ainsi sont apparus, dans les dernières années, de nouveaux « nexus » (*water-food-energy* par exemple), qui demandent à être explorés. Enfin, l'exploitation excessive des ressources pose des questions éthiques qui ne se ramènent pas simplement à une morale de la Nature mais ouvrent aussi à des questionnements critiques (post-coloniaux par exemple) sur l'usage inégal de ces ressources planétaires ou sur l'exposition différentielle aux dommages écologiques et sanitaires qui en découlent.

Dans ce contexte, la prospective de recherche ne s'oriente plus uniquement vers la question de la « protection des ressources naturelles » mais sur la compréhension des mécanismes qui gouvernent la construction et la constitution de ces ressources. Par exemple, il semble important de comprendre que les res-

sources naturelles échappent, elles aussi, à la division entre « nature » et « culture » : elles sont constituées en tant que telles à travers les usages humains mais n'en revêtent pas moins une part de récalcitrance et d'autonomie qui échappe à l'agir intentionnel des hommes. Il existe aussi des continuums d'usages que les travaux sur les déchets, le ré-usage, le recyclage ou sur le recyclage de l'énergie (chaleur) mettent en évidence.

C. Nature et biodiversité, écologie globale

1. Nature et biodiversité : positionnement, protection et conservation

Face aux enjeux actuels, l'effort de recherche doit être renforcé pour a) comprendre le rôle structurel et fonctionnel de la biodiversité au sein des écosystèmes et b) traduire ces connaissances en solutions visant à maintenir, protéger et réguler les systèmes socio-écologiques et les services écosystémiques. Ce champ de recherche est le lieu par excellence d'approches interdisciplinaires, entre sciences de la nature et de la terre et sciences humaines et sociales puisqu'il comprend des développements méthodologiques (suivis de terrain, indicateurs, modélisation, etc.), la compréhension fine des processus sous-jacents à différentes échelles de temps (dynamiques, interactions, résilience, etc.) et des questionnements épistémologiques et sociaux spécifiques (définition, perception, évaluation, réglementations, facteurs socio-politiques, etc.).

L'émergence de variations et de propriétés des écosystèmes sont difficilement perceptibles par une unique quantification de la diversité biologique, mais découlent à la fois d'une capacité adaptative des organismes vivants et d'un héritage historique complexe, sur des durées de temps parfois très longues, notamment au sein d'écosystèmes anthropisés. Les projections et scénarisations de la réponse environnementale doivent par exemple intégrer la possibilité d'adaptation des organismes

à de nouvelles niches écologiques. Ainsi, les concepts et approches empruntés à la biologie évolutive, comme science prédictive, prennent tout leur sens dans l'étude des effets des changements globaux sur, par exemple, la biodiversité. Le caractère prédictif de la biologie évolutive a notamment permis de comprendre des processus comme l'évolution des résistances aux antibiotiques en médecine humaine et vétérinaire, ou aux pesticides en agronomie.

Dans le contexte d'interactions anciennes entre les sociétés humaines et la nature, il convient de questionner la notion de « naturalité », qui intègre l'être humain comme élément de la nature, mais reste perçue par les uns comme l'antinomie de l'artificialisation et par d'autres comme la garantie d'une expression « naturelle » des processus écologiques. Les modes de gestion (agricole, forestière, marine) et les politiques de conservation doivent être analysés, pour comprendre comment cette « naturalité » s'est construite et maintenue dans le temps. Définir des objectifs de conservation renvoie en effet à mieux intégrer les trajectoires des dynamiques écologiques et leur impact sur les sociétés humaines et le fonctionnement des écosystèmes. C'est dans ce contexte que des projets de recherche en paléoenvironnement, en histoire de l'environnement ou en philosophie environnementale, par exemple, ont une place en CID 52 : ils intègrent l'étude des dynamiques environnementales du passé (en série plus ou moins longue, à partir de sources multiples, issues des sciences naturelles, sociales ou humaines) pour comprendre le présent et questionner l'avenir. Quels sont les seuils d'intervention au-delà desquelles l'artificialisation des milieux est irréversible ? Pour quels services écosystémiques, avec quelle biodiversité et selon quelle trajectoire écologique ? Quelle nature voulons-nous ? Ces questions sont au cœur de la CID 52. Les rétroactions de la nature sur les populations humaines le sont également, comme la manière dont ces dernières vont intégrer les éléments de la nature dans leurs ontologies, leurs schèmes de pensées, leurs systèmes de connaissances et leurs pratiques.

Les efforts visant à concilier la conservation de la nature et le développement humain impliquent donc l'intégration des sciences sociales et humaines dans la biologie de la conservation et l'incorporation des acteurs locaux (par exemple, membres des communautés, ONG, gouvernement local) dans la recherche, la gestion communautaire ou la conservation *in situ* de la biodiversité. Des stratégies de conservation équitables demandent (1) de prendre en compte la diversité des connaissances écologiques (y compris les systèmes de classification), des pratiques et des systèmes de représentations culturelles ; (2) d'aller au-delà de la dichotomie entre les humains et la nature en reconnaissant les interrelations entre les sociétés (humaines, animales) et leur environnement ; (3) d'analyser les processus de transformation et d'évolution de ces interactions.

Plus particulièrement, la prise en compte de la relation mutualiste entre les peuples autochtones, les communautés locales (animales, végétales, microbiennes) et l'environnement n'exclut pas les mesures scientifiques et la surveillance des états, processus, interactions et fonctions des écosystèmes. Les savoirs locaux et les savoirs scientifiques, notamment en écologie des communautés, partagent des concepts comme la connectivité et la parenté, aspects spécifiquement reconnus comme une préoccupation centrale de la conservation. La co-construction de projets de recherche, s'appuyant sur une interdisciplinarité de terrain et l'intersubjectivité des acteurs, doit faciliter la mise en œuvre d'actions de préservation de l'environnement.

2. Écologie globale

Comme évoqué précédemment, l'écologie globale est un champ scientifique qui irrigue nombre de recherches soutenues par la CID 52. Cette notion amène en effet à penser l'environnement de manière systémique et fonctionnelle, afin d'aborder les questions scientifiques dans toute leur complexité, à différentes échelles de temps et d'espace. Ceci est nécessaire pour contourner des visions trop sectorielles

pouvant conduire à des perceptions faussées, ou du moins à des interprétations partielles, des processus à l'œuvre. L'écologie globale affiche des objectifs de développement durable et opérationnels en proposant des résultats mobilisables, notamment dans l'aménagement du territoire, la gestion des ressources naturelles et la protection des écosystèmes. Elle a pour objectif d'identifier et d'intégrer les paramètres écologiques, biogéochimiques, physiques, sociaux (et leur évolution) au sein d'une approche holistique, afin de mieux appréhender et anticiper les risques environnementaux et leurs conséquences, mais aussi de poser les bases d'une gestion durable des ressources et des systèmes socio-écologiques pour, *in fine*, contribuer à la préservation de la biodiversité et à l'amélioration des conditions de vie des sociétés humaines et animales.

En se focalisant sur les systèmes socio-écologiques et les processus dynamiques qui les concernent, les développements fondamentaux associés au champ de l'écologie globale et la pertinence de ses applications dépendent étroitement de la prise en compte de l'hétérogénéité des sources de données, des échelles d'études et des systèmes étudiés. C'est pourquoi, dans le contexte actuel, il est indispensable de rapprocher scientifiques de diverses origines, gestionnaires et décideurs, dans une approche transdisciplinaire, pour développer les « outils » et des méthodes permettant d'appréhender les systèmes complexes qui caractérisent les principaux enjeux socio-environnementaux. D'un point de vue pratique, il paraît important de renforcer les échanges entre les communautés scientifiques et les recherches aux interfaces (éco-anthropologie ou ethno-écologie, éco-chimie, éco-physique, éco-mathématiques, etc.). C'est dans ce contexte que les initiatives structurantes (GDR, IRN, OHM ou ZA par exemple) permettent de mobiliser des communautés interdisciplinaires autour de thèmes (pollinisation, médiation chimique, invasions biologiques, pollution des sols et des cours d'eau, zoonoses, etc.) en lien avec les rôles des écosystèmes et la gestion et l'aménagement des territoires urbains, ruraux et ultra-marins.

D. Thèmes émergents, pratiques nouvelles

1. Nouvelles approches pour appréhender l'environnement

Les recherches environnementales intègrent de nouvelles visions et perceptions de la nature. De nouvelles approches émergent, se nourrissant de disciplines encore peu mobilisées dans le champ environnemental ou s'appropriant des techniques jusqu'alors réservées à d'autres champs de recherche. Ainsi les recherches sur la « nature » en ville (écologie urbaine) se multiplient et gommant les frontières disciplinaires habituelles, intégrant par exemple la psychologie environnementale.

Le développement des techniques de séquençage à haut débit (métagénomique) appliquées à l'environnement a permis d'accéder aux composantes microscopiques des organismes ou des écosystèmes, et révélé une complexité jusqu'alors invisible : les organismes macroscopiques forment une entité fonctionnelle avec leur microbiote. Dans un contexte de changements des milieux de vie, le concept d'holobionte questionne ainsi les pratiques de conservation, l'adaptation des écosystèmes aux changements, les relations santé-environnement, et ouvre parallèlement des questions éthiques, juridiques et philosophiques.

L'application de techniques à haute résolution et à haut débit (chimie, traçages isotopiques, métabolomique, métagénomique, etc.) aux suivis environnementaux accompagne l'essor de nouvelles thématiques de recherche en lien avec la santé des sociétés et des écosystèmes, passés et présents (exposome, perturbateurs, nanopolluants, alimentation, communication chimique, etc.). L'intégration des données issues de sources multiples recoupe le défi actuel de la gestion et l'analyse des « big data », créant des interfaces entre les sciences de l'environnement et les mathématiques, l'informatique ou les sciences de l'information. La préservation et la mise à disposition

des données multiples, et très hétérogènes, qui permettent de décrire la complexité environnementale demande de plus un effort particulier dans la création de banques de données inter opérationnelles, avant de pouvoir arriver au statut d'*open data* réclamé par les tutelles.

2. Écologie de la santé

L'écologie de la santé constitue un champ de recherche émergent s'intéressant aux liens entre l'environnement et la santé des populations et des écosystèmes, qu'elles soient humaines, animales ou végétales; du passé comme du présent. Si l'écologie de la santé s'applique à la vie dans son ensemble – et constitue donc une approche volontairement englobante –, les perturbations climatiques dues aux activités humaines, la crise actuelle de la biodiversité, l'émergence de nouvelles épidémies, voire la réémergence de certaines autres, et la prise en compte d'expositions multiples (concept d'exposome, pollutions) rendent cette approche holistique particulièrement pertinente dans le contexte contemporain. Alors que les approches de type « *One Health* » en écologie se sont d'abord focalisées sur la lutte contre l'émergence des zoonoses, la prise en compte des écosystèmes et de leurs composantes biotiques et abiotiques devient maintenant centrale en écologie de la santé. Ainsi, des approches favorisant l'étude de l'interdépendance, la coexistence et l'évolution des êtres vivants et de leur environnement, lui-même en pleine mutation, paraissent aujourd'hui essentielles. Cela concerne, par exemple, les recherches en épidémiologie écologique et évolutive, en éco-toxicologie, sur la santé en milieu urbain ou sur le rôle des microbiotes et de leur déséquilibre (notion de « dysbiose »). La prise en compte des différentes composantes de la biodiversité, du stress physiologique des populations et des modifications d'habitats, est aussi nécessaire pour obtenir une vision globale du fonctionnement des écosystèmes. Un enjeu majeur est donc aujourd'hui de franchir les frontières qui séparent la médecine humaine et vétérinaire des sciences de l'écologie, de l'évolution et de l'en-

vironnement. La triade « environnement-santé-sociétés » constitue le socle sur lequel repose toute approche en écologie de la santé. Ainsi située aux frontières des sciences de l'environnement, des sciences biomédicales et des sciences humaines et sociales, l'écologie de la santé constitue un champ de recherche interdisciplinaire ouvrant de nouvelles voies pour améliorer la santé des espèces vivantes sur une planète, elle aussi, en danger.

3. Humanités environnementales

Ces dernières années ont vu l'arrivée et l'essor dans la recherche francophone du label « Humanités environnementales », traduction littérale de *environmental humanities*. Ce label, auquel certains ont préféré celui plus classique d'« études environnementales » (traduction de *environmental studies*, que les anglophones distinguent des *environmental sciences* ancrées en sciences biophysiques), traduit la structuration d'un champ de recherche interdisciplinaire sur l'environnement, au croisement de l'écologie et de plusieurs disciplines des sciences humaines et sociales, parmi lesquelles on citera la philosophie, l'anthropologie, la géographie, la sociologie, l'économie, les sciences politiques, les études littéraires... Ce mouvement s'inscrit dans une temporalité plus longue des sciences humaines et sociales. Celles-ci ont été marquées dans les années 1970 par les approches matérialistes issues du marxisme; puis dans les années 1990 par l'hégémonie du constructivisme social (l'idée que le monde et les catégories pour le penser sont socialement construits). À partir du milieu des années 2000, la crise écologique planétaire s'imposant, il est apparu que les approches constructivistes avaient eu tendance à occulter la dimension matérielle des existences, et qu'il convenait de renouveler l'attention sur celles-ci. Ce nouveau matérialisme s'accompagne de revendications épistémologiques fortes, de dépassement du sociocentrisme supposé fondateur des sciences humaines et sociales, à travers des collaborations étroites avec les sciences de la nature, de la terre et des matériaux. On peut noter que des champs de recherche interdisci-

plinaires déjà anciens, mais restés marginaux dans leur discipline d'appartenance, se voient dans ce nouveau contexte parés du statut de pionniers : citons l'« économie écologique » qui, par contraste avec l'économie de l'environnement, cherche à intégrer les dynamiques écologiques dans la compréhension des logiques d'appropriation et d'exploitation des ressources naturelles ; citons également l'histoire environnementale qui se nourrit non seulement des sources classiques des historiens, mais aussi des sources inscrites dans l'environnement.

4. Recherches et sciences participatives

La dernière décennie a été marquée par un engouement pour les approches dites « participatives » en recherche, et plus particulièrement dans le domaine de l'environnement. La « co-construction » avec les populations locales s'est imposée au cours des années 1970-1980 comme la meilleure façon d'augmenter tant la légitimité démocratique que l'efficacité des projets de développement et de conservation. L'engagement des acteurs locaux dans les projets participatifs se décline sur un gradient qui va de la simple consultation à l'intégration de leurs logiques et revendications. Ces approches offrent des cadres flexibles en intégrant les connexions – y compris les convergences et les divergences – entre les savoirs locaux et scientifiques. Des dynamiques plus politiques ont aussi pesé dans les arènes internationales de gouvernance de l'environnement qui – du Sommet de la Terre à Rio en 1992 à la création de l'IPBES – ont accordé une place officielle aux savoirs autochtones. Par ailleurs, les zones d'incertitude qu'ouvrent les dynamiques environnementales (qu'il s'agisse du risque technologique ou du fonctionnement des écosystèmes dans un contexte de changement global) ont remis en question les conceptions classiques de l'expertise. À partir des années 1990, il est apparu que la production d'expertises sur des problèmes complexes devait s'appuyer non seulement sur une multiplicité de paradigmes disciplinaires mais aussi inclure les perspectives d'acteurs non scientifiques. Enfin, le besoin de réaliser des suivis de l'état de l'environnement, associé aux

progrès de la statistique et aux possibilités ouvertes par le numérique et les big data, ont contribué au formidable essor des « sciences participatives » (citizen sciences en anglais) reposant sur la contribution massive de contributeurs bénévoles à des projets dirigés par des scientifiques. La conjonction de ces dynamiques a favorisé la contribution croissante de publics non académiques dans la production d'expertises et de savoirs environnementaux.

Nous sommes désormais dans une période de soutien institutionnel à la recherche participative qui renouvelle la posture et les activités des chercheur.e.s. Ceux-ci ne sont plus considérés comme ayant le monopole du savoir, mais deviennent experts parmi d'autres. Dans le domaine environnemental, certains chercheur.e.s se forment une compétence dans la conception ou l'animation de dispositifs scientifiques visant l'intégration de savoirs multiples ; d'autres maintiennent une démarche plus analytique, visant à élucider les incommensurabilités entre ces formes de savoirs et les frictions que leur rencontre génère (cette dernière ligne de recherche se trouvant à l'intersection entre les CID 52 et CID 53).

II. Forces, opportunités et angles morts de la recherche environnementale

A. Bilan pluriannuel (UMR, chercheur.e.s, recrutements)

1. Présentation chiffrée des contours de la CID 52

Actuellement, la CID 52 est une section secondaire d'évaluation de 69 unités de recherche (UMR, UMI, UMS, USR et FR) et en charge

de 11 Zones Ateliers (ZA). Elle est également sollicitée pour donner un avis scientifique sur des écoles thématiques et des groupements de recherche (GDR).

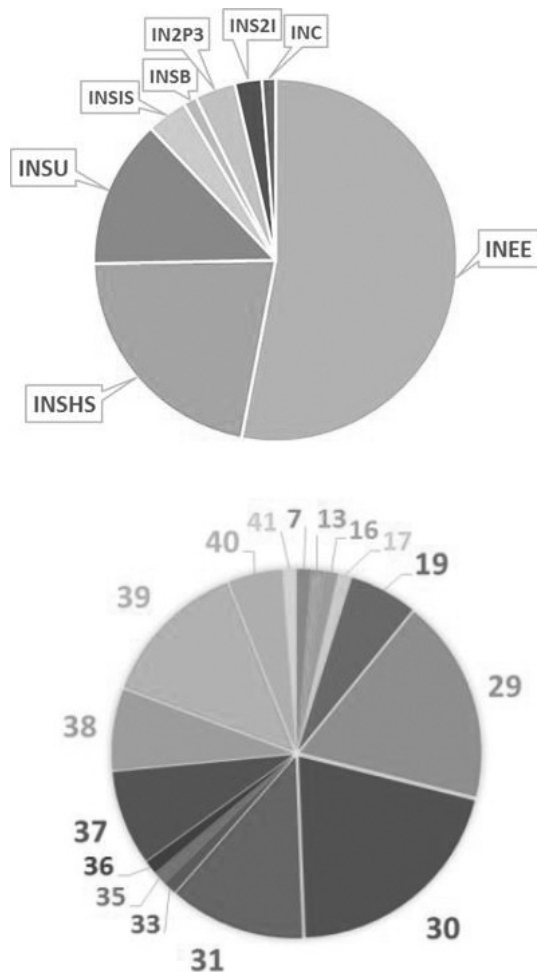
83 chercheur.e.s CNRS sont rattaché.e.s en section secondaire à la CID 52, dont 42 CR (40 CRCN, 2 CRCH) et 41 DR (39 DR2, 2 DR1). Ils se répartissent dans 56 unités au niveau national : la grande majorité (39 unités) n'héberge qu'un.e seul.e chercheur.e rattaché.e à la CID 52, 12 unités en hébergent deux. Les 5 dernières unités en comptent respectivement 3, 4 et 6.

La répartition des chercheur.e.s évalué.e.s par la CID 52, selon les Instituts et les sections principales de rattachement, est présentée dans la figure ci-contre. La majorité (44 chercheur.e.s, soit 53%) travaille dans une unité rattachée principalement à l'INEE, alors que 18 et 11 chercheur.e.s sont dans des laboratoires dépendants de l'INSHS et l'INSU, respectivement. La dizaine d'autres chercheur.e.s appartient à des unités rattachées à l'INSIS, l'INSB, l'INC et l'INS2I et l'IN2P3. Les sections disciplinaires concernées sont, par ordre décroissant, les sections 30, 29, 39, 31, 37, 38, 19 et 40 avec, respectivement, 17, 15, 11, 10, 7, 6, 5 et 4 chercheur.e.s de la CID 52.

2. Historique et bilan des recrutements de chercheur.e.s

Un bilan a été réalisé sur la période 2008-2019 afin d'avoir une vision d'ensemble des recrutements interdisciplinaires dans le domaine «environnement, sociétés» depuis 10 ans. Ce bilan est donc le reflet du travail de trois commissions : la CID 45 de 2008 à 2011, puis la CID 52 de 2012 à 2015, et la commission actuelle qui siège depuis 2017.

Pendant la période 2008-2019 (les chiffres pour la période 2012-2019, correspondant à la CID 52, sont indiqués entre parenthèses), sur les 60 (30) chargé.e.s de recherche (45% de femmes, CR2, CR1 et CRCN confondus) recruté.e.s au CNRS, 36 (17) ont été affecté.e.s dans des unités de recherche rattachées principale-



Distribution des effectifs de chercheur.e.s, rattaché.e.s à la CID 52, selon l'institut de rattachement de leur unité d'affectation (haut) ou de leur section disciplinaire principale (bas).

ment à l'INEE, 19 (7) à l'INSHS et 5 (4) à l'INSU. Deux autres chercheur.e.s recruté.e.s en CID 45 ont été affecté.e.s à des laboratoires de l'IN2P3 et l'INS2I. À la suite de leur recrutement, ces chargé.e.s de recherche ont demandé leur rattachement principal à une section disciplinaire, les CID étant des sections secondaires d'évaluation. Les sections concernées sont par ordre décroissant : la section 29 avec 14 (4) CRCN, la section 31 avec 12 (6) CRCN, la section 30 avec 10 (3) CRCN, la sec-

tion 39 avec 8 (6) CRCN, la section 19 et la section 38 avec 5 (3 et 5) CRCN chacune, la section 35 avec 3 (0) CRCN, les sections 36, 37 et 40 avec 1 CRCN chacune, recruté depuis 2012.

Pour la même période, il y a eu 43 (21) recrutements de DR2 en CID 45 puis CID 52, dont 37,2 % de femmes promues. 23 (17) de ces lauréat.e.s ont été affecté.e.s dans des laboratoires rattachés principalement à l'INEE, alors que 12 (7) DR2 travaillent dans des unités rattachées à l'INSHS et 3 DR2 ont été recruté.e.s dans des laboratoires de l'INSU depuis 2012. Par ailleurs, un.e DR2 a été rattaché.e à un laboratoire de l'INC, l'INS2I, l'INSB, l'IN2P3 et l'INSIS. Les sections disciplinaires de rattachement principal des DR2 promu.e.s sont par ordre décroissant : la section 30 avec 11 (9) DR2, la section 29 avec 8 (6) DR2, la section 37 avec 7 (3) DR2, la section 31 avec 4 (4) DR2, les sections 39 et 40 avec 3 (3) et 2 (1) DR2, respectivement, et un.e seul.e DR2 rattaché.e aux sections 7, 13, 16, 19, 33, 35, 38 et 41.

Les projets de recherche des jeunes chercheur.e.s recruté.e.s depuis 10 ans se développent à l'interface de plusieurs disciplines, mettent en pratique l'interdisciplinarité, et renvoient chacun à plusieurs mots-clés de la CID 52. En résumé, les grandes thématiques abordées se focalisent sur les changements planétaires et les interactions biosphère-atmosphère ; les liens entre environnement, santé et sociétés ; les relations homme-nature ; l'économie de la santé ; les stratégies de développement durable. Une majorité de jeunes chercheur.e.s recruté.e.s s'inscrivent en écologie de la santé, en écologie globale, en écologie chimique et éco-toxicologie, en génétique et génomique évolutive et environnementale, en paléo-écologie et paléo-environnement, en bio- et géo-archéologie. Les thématiques de recherche développées par les DR sont sensiblement les mêmes, auxquelles s'ajoutent les relations entre ressources naturelles et santé, les questions de dynamique spatiale et de territoire, les changements planétaires, à l'interface entre écologie et mathématiques.

B. Analyse SWOT

Les éléments qui suivent sont issus d'une réflexion menée au sein de la CID 52. Celle-ci n'a pas vocation à dresser un schéma exhaustif du paysage actuel, mais a pour but de souligner quelques éléments essentiels de la recherche interdisciplinaire à l'interface entre environnement et sociétés.

1. Forces

Les relations entre l'environnement et la société constituent un sujet politique, social et scientifique majeur à l'heure du changement climatique et de la crise de la biodiversité. La sensibilisation des populations à ces questions médiatisées est indéniable. La presse écrite, comme radiophonique et télévisuelle, ne cesse de nous rappeler l'absolue nécessité de lutter contre ces perturbations environnementales, qui impactent en retour nos conditions d'existence. Dans ce contexte, le vivier de jeunes chercheur.e.s s'intéressant à l'environnement – qu'ils viennent directement de l'écologie ou qu'ils soient issus d'autres filières disciplinaires – est immense. Cette masse critique constitue un des points forts de la CID 52, où la pression du concours fait partie des plus importantes. Au cours de ces trois dernières années, la CID 52 a en effet noté une augmentation significative du nombre de candidatures au concours de chargé.e de recherche (de 42,3 à 47,5 candidatures par poste entre 2017 et 2019). Elle a pu aussi constater que de très nombreux jeunes chercheur.e.s ont développé une approche interdisciplinaire dès leur doctorat. Cette interdisciplinarité peut se situer à l'intérieur de grands champs scientifiques comme à leur interface, mais est toujours bénéficiaire d'une curiosité et d'une ouverture bénéfiques à la démarche scientifique, qui ne saurait produire de résultats véritablement pertinents en se coupant des autres domaines du savoir. Ces profils d'interdisciplinarité « avérée » – que ce soit au travers de publications, de collaborations ou de projets en cours – ont été reconnus et valorisés par la CID 52, qui a conscience des

difficultés qu'il existe à dépasser l'hyperspécialisation des savoirs (par ailleurs nécessaire). D'autant plus à un stade précoce de sa carrière scientifique.

Les recherches portant sur les liens entre environnement et sociétés ont également l'avantage de pouvoir être publiées dans une multitude de supports. Elles intéressent aussi bien les revues spécialisées sur ces interactions (Environmental Ethics, NSS, Ecology & Society, Conservation & society, etc.) que les revues généralistes (Nature, Science, PLOS ONE, etc.) et les revues disciplinaires soucieuses de mettre l'accent sur les questions d'environnement. Dans le contexte des perturbations environnementales affectant l'ensemble du monde vivant, le domaine de publications relevant de la CID 52 ne pourra que s'accroître dans les années à venir, donnant toujours plus de visibilité aux travaux interdisciplinaires entre environnement et sociétés.

Après des années de valorisation institutionnelle (et officielle) de l'interdisciplinarité, il apparaît que les recherches croisant différents domaines du savoir commencent à être mieux acceptées, et publiées, qu'auparavant. Les éditeurs, comme les bailleurs de fonds, semblent avoir progressivement pris conscience de l'apport des travaux menés aux interfaces et permettant de dépasser les paradigmes disciplinaires. Le potentiel de rupture inhérent aux démarches interdisciplinaires est désormais reconnu et encouragé, mais aussi considéré (à juste titre) comme une véritable nécessité pour faire avancer les savoirs vers des directions encore inconnues.

Les interactions entre environnement et sociétés sont au cœur de nombreuses structures opérationnelles, à tous les niveaux. Le GIEC et ses groupes de travail, comme l'IPBES, en constituent probablement les exemples les plus fameux au niveau international. Plus modestes et moins médiatisées, des structures de recherche comme les OHM et les ZA permettent de produire les résultats sur lesquels les grandes instances internationales peuvent s'appuyer pour la rédaction de leurs rapports.

L'interaction entre ces différents niveaux est indispensable pour l'avancée des savoirs dans le domaine de l'environnement et montre à quel point les « débouchés » peuvent y être nombreux à l'heure du changement climatique.

2. Faiblesses

Un des risques majeurs dans le domaine de l'environnement, comme d'ailleurs dans tout champ de recherche, réside dans le maintien d'une « science normale », s'appuyant toujours sur les mêmes paradigmes et, par conséquent, sans potentiel de ruptures. Si l'interdisciplinarité semble au premier abord se poser en rempart contre ce risque en demandant aux scientifiques qui la pratiquent de toujours remettre en cause (et redéfinir) leurs paradigmes, il faut rester vigilant face aux discours concernant l'interdisciplinarité, qui ne saurait être à l'abri de leur propre redondance et autres effets de mode. La CID 52 est par conséquent particulièrement attentive à la pertinence de l'interdisciplinarité mise en œuvre, qui ne saurait regrouper l'ensemble des savoirs, sur l'ensemble des objets d'étude environnementaux. Par exemple, si les approches théoriques de modélisation sont indispensables aux problématiques environnementales, les données mobilisées et les simplifications inhérentes à la démarche doivent (souvent) être éclaircies pour « faire sens ».

Par ailleurs, une attention particulière doit être portée au vocabulaire employé par les grandes institutions internationales et les médias. La migration des concepts scientifiques vers le grand public se déroule avec des transformations, des interprétations ou des raccourcis qu'il s'agit de scruter pour éviter tout amalgame entre les résultats de la science et les usages qui peuvent en être faits.

3. Opportunités

La thématique de l'environnement s'impose comme une thématique d'avenir, qu'il s'agit de

construire dès à présent. Ce contexte, lié à l'urgence de la situation environnementale, constitue une opportunité exceptionnelle pour les profils interdisciplinaires œuvrant dans le domaine de l'environnement.

Cependant, si la crise climatique et les perturbations environnementales, dans leur ensemble, mettent l'accent sur le rôle des scientifiques dans la lutte contre le changement climatique et la transition écologique, après trois années de concours, la CID 52 a constaté que peu de projets étaient inscrits en sciences politiques de l'environnement. Si tous les autres domaines semblent actuellement représentés, cette approche est aujourd'hui la grande absente des thématiques environnementales observées en CID 52.

Par ailleurs, l'évolution actuelle des formations universitaires et de la formation par la recherche montre que l'interdisciplinarité s'ancre fortement dans les filières axées sur les sciences environnementales et le développement durable, qui connaissent un engouement notable.

4. Menaces

Bien entendu, la plus grande menace pour la recherche interdisciplinaire dans le domaine de l'environnement réside dans la réduction du budget alloué à la recherche en général. Elle impacte directement la CID 52, comme les autres sections du CNRS. Cependant, la recherche interdisciplinaire nécessitant, par définition même, de s'étendre sur un temps plus long, avec des risques plus importants, le risque de la voir dévalorisée au profit d'approches avec des rendus plus immédiats est grande. Il est donc nécessaire de prendre en considération ces particularismes de l'interdisciplinarité pour que la recherche aux interfaces perdure et engendre les ruptures que l'on attend d'elle.

Dans une période de restriction budgétaire et de diminution du nombre de postes perma-

nents ouverts au concours, le danger est latent de voir un repliement de certaines disciplines sur leur cœur de métier, ce qui favoriserait le recrutement de chercheur.e.s disciplinaires au détriment de l'interdisciplinarité. Comme l'indique l'analyse de la répartition des chercheur.e.s de la CID 52, la grande majorité appartient à des laboratoires qui ne comptent qu'un seul chercheur en CID 52. Un faible nombre de chercheur.e.s interdisciplinaires recruté.e.s au sein des unités de recherche pourrait constituer un risque d'isolement pour ceux-ci à moyen et long terme. Ils peuvent cependant jouer un rôle clé, localement, en favorisant les projets collaboratifs entre les différentes unités d'un même site.

Enfin l'utilisation de l'anglais reste incontournable dans les productions scientifiques. Néanmoins, nous attirons l'attention sur la menace que constitue actuellement une standardisation excessive des publications et sur le piège d'une évaluation quantitative se limitant à des indices de citation ou de facteurs d'impacts. La globalisation implique la mise en commun d'une multitude de cultures scientifiques. L'utilisation exclusive de l'anglais peut être à l'origine d'un appauvrissement des concepts et des notions sous-tendant les propos des chercheur.e.s, notamment en sciences humaines et sociales. Des travaux linguistiquement inscrits dans leur contexte constituent d'ailleurs des opportunités pour la création d'écoles de pensées susceptibles d'être par la suite traduites dans d'autres langues. De même, le format des articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture peut parfois constituer un carcan dont les chercheur.e.s doivent s'extraire pour développer et argumenter leur propos. Les ouvrages scientifiques constituent alors des alternatives valorisées. En somme, dans le cas d'une commission interdisciplinaire, le rayonnement international des chercheur.e.s doit être évalué dans ce contexte de globalisation, en tenant compte du multilinguisme et de la diversité des cultures scientifiques.

III. Organisation et nouvelles pratiques de recherche

A. Organisation de la recherche interdisciplinaire

La CID 52 a pu constater que la pratique de l'interdisciplinarité est déjà à l'œuvre dans de nombreux laboratoires de recherche orientés vers les problématiques environnementales. Certes, le nombre d'unités ayant demandé leur rattachement à la CID 52 reste encore modeste, mais la diversité de ces laboratoires augmente parallèlement au nombre de jeunes chercheur.e.s recruté.e.s. Il est souhaitable de renforcer l'ancrage de ces pratiques interdisciplinaires au sein des laboratoires par l'accueil d'un nombre minimal de chercheur.e.s interdisciplinaires car la recherche interdisciplinaire nécessite une masse critique pour s'épanouir sur le long terme.

Les UMR, comme les UMI, constituent le plus souvent des structures de recherche où l'interdisciplinarité (entre disciplines d'un même grand domaine de recherche ou entre domaines) est mise en œuvre et valorisée, que ce soit entre membres d'une même équipe ou entre équipes. Cette organisation en laboratoires et en équipes est à même de favoriser les interactions nécessaires à l'interdisciplinarité et à l'émergence de nouvelles approches. Le regroupement des petites unités de recherche en plus gros laboratoires semble en ce sens constituer une opportunité pour le développement des approches interdisciplinaires. Localement, les Zones Ateliers et les Observatoires Hommes-Milieux sont des structures dédiées à ces approches interdisciplinaires, et à même de les fédérer sur des territoires délimités. Par ailleurs, à l'heure de la globalisation, d'autres formes de structuration doivent être renforcées pour faciliter le développement de thématiques émergentes et favoriser les démarches interdisciplinaires aux échelles nationale et

internationale. Ainsi, les FRE, les GDR, les IRN (ex-GDRI) ou encore les LIA pourraient bénéficier de davantage de soutien. Ces structures transversales sont nécessaires au dialogue entre chercheur.e.s issus d'univers différents mais travaillant sur des objets communs. Leur nombre et leur durée pourraient être augmentés car l'interdisciplinarité est chronophage et nécessite des interactions récurrentes pour prendre forme.

B. Interactions avec la société

Les recherches en environnement ne peuvent pas être déconnectées des enjeux sociétaux. Les interactions sont telles que nous devons désormais assumer, appréhender et développer la notion d'interdépendance entre l'humain et le non-humain, entre les dynamiques de la biodiversité et le développement harmonieux des sociétés humaines, entre les problématiques environnementales, le bien-être humain et la préservation des milieux de vie.

Dans ce contexte, la production d'articles scientifiques, destinée à valoriser les résultats ou confronter des hypothèses au sein d'une communauté de spécialistes, ne peut plus être le seul objectif, mais doit constituer une étape avant d'envisager un véritable transfert vers les décideurs, gestionnaires, aménageurs et l'ensemble de la société civile. Maintenant plus que jamais, et en particulier dans le domaine des sciences de l'environnement, il est devenu urgent de connecter les connaissances fondamentales à l'opérationnel par l'innovation dans la valorisation, la réalisation de la transversalité et par le développement de méthodologies de transferts.

Une voie d'innovation se situe au niveau des collaborations entre les espaces naturels protégés, notamment les Parc Naturels Régionaux, les Parcs Nationaux et les Réserves de biosphère, qui peuvent constituer des territoires d'expérimentation particulièrement pertinents et représenter une offre partenariale

riche, aussi bien pour l'accompagnement des travaux de recherche que pour la médiation des résultats vers le grand public, les techniciens et les élus.

Du fait de la complexité des systèmes socio-écologiques, structurés par des interactions diversifiées et dynamiques, la recherche n'est plus en situation de fournir des experts en tant que tels. En revanche, elle propose des groupes de chercheur.e.s interdisciplinaires pour étudier cette complexité et envisager, de manière collective et collaborative, les voies d'un développement plus durable visant à amoindrir les effets de la crise socio-environnementale sur les ressources naturelles et les productions agricoles ou sur des écosystèmes sensibles. Des projets de recherche, en connexion étroite avec les populations locales, sont ainsi conduits au sein des ZA et des OHM, qui embrassent une grande diversité de terrains d'études, de zones urbaines, bassins versants, à des territoires impactés par des pollutions, en passant par des zones d'élevage en Afrique de l'Ouest

L'impact de la recherche en environnement sur la société et les rétroactions qui en découlent passe nécessairement par un investissement significatif dans les processus de communication et les différents média. Paradoxalement, ce sont encore trop souvent des non spécialistes qui communiquent sur les grands enjeux environnementaux ou les questions écologiques. La faible présence médiatique de chercheur.e.s spécialisé.e.s dans l'étude de la complexité socio-environnementale constitue sans doute un frein dans la prise de conscience et la compréhension globale des véritables enjeux du XXI^e siècle et des orientations politiques qui doivent être prises.

Une autre manière de rendre les recherches environnementales accessibles au-delà des milieux académiques réside dans les interactions avec le monde artistique (art environnemental ou écologique). Dans ce domaine émergent, des chercheur.e.s expérimentent des formes novatrices d'écriture et de restitution (recours aux films, à la création multimédia...) en intégrant le processus de création artistique. Cette ouverture aux formes sensibles

de restitution du savoir apparaît tout à fait pertinente compte tenu des enjeux de la crise écologique. Elle est compatible de surcroît avec les injonctions institutionnelles de décloisonnement des savoirs académiques et d'intervention des chercheur.e.s dans la cité.

C. Place et rôle du CNRS sur les problématiques environnementales

En France, le CNRS est sans doute le seul organisme permettant la mise en œuvre de l'interdisciplinarité à travers le recrutement de jeunes chercheur.e.s au sein des laboratoires. D'autres organismes comme l'IRD et le CIRAD le font également, mais en recrutant des chercheur.e.s disciplinaires dans des unités interdisciplinaires. La CID 52 joue là un rôle capital en offrant des débouchés professionnels à des jeunes chercheur.e.s au parcours original et à la démarche interdisciplinaire, comme nous le savons, risquée et chronophage.

La CID 52 est composée de scientifiques aux expertises diverses (écologues, biologistes, anthropologues (anthropologie biologique et anthropologie sociale), géographes (géographie physique et humaine), ethnoécologues, physiciens, chimistes, géochimistes, mathématiciens, juristes) tous sensibilisés et impliqués dans des démarches interdisciplinaires. Elle fait le pari de l'intelligence collective, de la mutualisation des savoirs, avec succès depuis sa création. Les regards croisés sont à même d'évaluer de manière pertinente l'interdisciplinarité des chercheur.e.s en balayant de fait un nombre non négligeable de grands champs scientifiques et d'interactions disciplinaires, permettant ainsi à des candidats issus de paradigmes épistémologiques très différents, ainsi qu'à des candidats jugés « atypiques » dans leur section d'origine, d'être évalués au plus près de leurs compétences.

Avec dix ans de recul sur les recrutements en CID 52, la diversité des sections principales de rattachement des CRCN et DR2 est le reflet des multiples formes d'interdisciplinarité rencontrées sur les problématiques environnementales actuelles, puisqu'elles couvrent quasiment l'ensemble des sections du CNRS ayant un lien avec l'environnement *sensu largo*. Il est fondamental de maintenir cet éventail disciplinaire, le plus large possible. Le double rattachement des chercheur.e.s, recruté.e.s et évalué.e.s par la CID 52, leur permet de garder un ancrage dans une discipline et une communauté. Il favorise également, via les échanges entre les membres des sections disciplinaires et la CID 52, la diffusion des pratiques interdisciplinaires au sein des sections. Néanmoins, certains chercheur.e.s dont les recherches sont au cœur de la CID 52 restent parfois à la marge de leur section disciplinaire de rattachement, et il serait alors souhaitable de considérer la CID 52 comme une section principale d'évaluation. La CID 52 déplore aussi qu'elle ne puisse suivre l'évolution des carrières de jeunes chercheur.e.s recruté.e.s, ou suite à une promotion DR2, en émettant des avis sur les avancements de grades CRCN/ CRCH, DR2/ DR1.

Avec les ZA et les OHM, le CNRS dispose également de dispositifs d'observation et d'expérimentation performants des socio-écosystèmes, malheureusement encore trop peu dotés en termes de moyens financiers et humains. L'enjeu est pourtant immense puisqu'il s'agit, ni plus ni moins, de maintenir les suivis à long terme des paramètres environnementaux tout en renforçant l'observation simultanée des composantes humaines et sociales du socio-écosystème (enquêtes, suivi de cohortes, etc.). Le retour d'expériences des OHM, et du LabEx DRIIHM (Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieus) qui les rassemblent, permet de souligner que les approches socio-écosystémiques nécessitent une certaine durée pour s'établir : les résultats les plus probants sont parus une dizaine d'années après le lancement des dispositifs de recherche, temps nécessaire pour que les collectifs se créent et se connaissent, et que le suivi longitudinal des variations socio-environnementales donne ses premiers résultats.

Conclusion

Les problématiques environnementales nécessitent d'être abordées dans leur globalité. De fait, seule l'hybridation de disciplines issues des sciences de la terre, de la vie et de la société permettent la prise en compte de leur complexité, à la fois physique, chimique, biologique, écologique, humaine et sociale, par des approches quantitatives et qualitatives et à différentes échelles spatio-temporelles. Au cours des dernières années, les profils très variés des jeunes chercheur.e.s recruté.e.s en CID 52, ainsi que leurs laboratoires d'affectations, montrent que ce croisement des disciplines opère avec succès. Maintenir, et même renforcer, ces recrutements aux profils interdisciplinaires est maintenant crucial, tout comme pérenniser les moyens et outils mis en place par le CNRS pour soutenir des recherches à l'interface entre environnement et sociétés. Ces recherches ne sont pas exemptes de prises de risques, au contraire, s'inscrivent parfois sur un temps long, et conduisent souvent à sortir des sentiers battus pour réellement innover. Elles ont l'ambition et la capacité d'être à l'origine d'une innovation globale, pour tous, sur tous les fronts des savoirs et des connaissances.

Alors que la prise de conscience des changements en cours se généralise, et que l'impératif de la transition écologique s'impose, la fracture s'accroît entre d'un côté une recherche de pointe, de plus en plus spécialisée, et de l'autre côté une société amenée à prendre des décisions collégiales sur des enjeux cruciaux. La pratique de l'interdisciplinarité et sa diffusion au sein des communautés scientifiques (et même au-delà), tout comme la mise en œuvre de recherches participatives, contribuent à combler ce gouffre. S'appuyer sur la pluralité des expertises et sur l'intelligence collective est devenu une nécessité pour répondre aux questions environnementales contemporaines. Face à l'urgence de la situation, la recherche publique, au service du bien commun, doit bénéficier d'un soutien à la hauteur des enjeux.

CID 53

MÉTHODES, PRATIQUES ET COMMUNICATIONS DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

Composition de la commission interdisciplinaire – CID

Yannick BARTHE (président de la commission), David TOUBOUL (secrétaire scientifique), Constantina BACALEXI, Florent CHAMPY, Renaud CRESPIN, Mélanie DULONG DE ROSNAY, Nathalie ETCHART-VINCENT, Valérie FALCK, Anne FERNANDEZ, Susanne FURNISS-YACOUBI, Nathalie GILLES, Marie-Christine GONTHIER, Christophe INNOCENT, Maguy JABER, Catherine JAMI, Olivier LECLERC, Pierre MARQUIS, Marta SEGARRA MONTANER, Jean-Christophe VERGNAUD.

Résumé

Les questions qui accompagnent le développement des sciences et des techniques appellent des recherches capables d'en comprendre les ressorts et d'en analyser les enjeux. La commission interdisciplinaire « Méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques » a été créée dans le but de favoriser les travaux qui, pour mieux appréhender les problèmes soulevés par les sciences en société, s'engagent dans une démarche interdisciplinaire. Après avoir précisé le périmètre de cette commission, le présent rapport signale les principales thématiques pour lesquelles un dynamisme de la recherche est d'ores et déjà manifeste et d'autres qui devraient susciter un intérêt grandissant dans les années à venir. Le rapport se clôt par une

analyse des principaux enjeux méthodologiques et institutionnels auxquels les recherches interdisciplinaires soutenues par la CID se trouvent confrontées.

Introduction

Créée en 2012 sous l'intitulé « Méthodes, pratiques, et communications des sciences et des techniques » (DEC122262DAJ, 31 août 2012, BO CNRS, n° 8, août 2012), la CID 53 est pilotée par l'Institut des Sciences Humaines et Sociales (InSHS). Elle est composée de membres venant à la fois des sciences de la nature et

des sciences formelles (biologie, chimie, informatique, mathématiques, etc.) et de membres venant des sciences humaines et sociales (sociologie, histoire, anthropologie, économie, etc.). Sa vocation est de promouvoir des projets innovants centrés sur l'étude des sciences et des techniques. Comme l'indiquent ses nombreux mots-clés (http://www.cnrs.fr/comitenational/cid/mots_cles_CID_16-21.pdf), la CID 53 évalue des travaux de recherche qui peuvent relever de toutes les disciplines des sciences humaines et sociales (sociologie, anthropologie, histoire, philosophie, géographie, économie, droit, études littéraires et artistiques, etc.) mais qui se caractérisent par une ouverture disciplinaire en direction des sciences formelles et des sciences de la nature. Elle est également sensible à des projets de recherche relevant d'autres disciplines et dont la particularité est de proposer des méthodes originales qui viennent renouveler les approches en sciences humaines et sociales, à la condition cependant que ces approches des SHS soient interrogées de façon réflexive dans le travail.

La CID 53 valorise par ailleurs les recherches susceptibles d'éclairer les enjeux sociaux, les problèmes éthiques ainsi que les controverses publiques que suscite le développement des sciences et des techniques. De même, elle accueille les travaux portant sur les dispositifs, les technologies et les procédures dont l'ambition est de favoriser « l'entrée des sciences et des techniques en société » (méthodes d'information et de communication, dispositifs de consultation et débat public, sciences participatives, etc.).

Le mandat 2016-2021 est le second mandat assuré par cette commission interdisciplinaire. Le présent rapport de conjoncture s'appuie sur l'expérience acquise au cours des trois dernières années de fonctionnement de la CID 53. Il entend dans un premier temps préciser le périmètre d'action de cette commission, en revenant sur la conception de l'interdisciplinarité qu'elle cherche à promouvoir, et sur les profils des chercheur.e.s qu'elle a recruté.e.s ou qui, recruté.e.s par une autre section, ont demandé à y être rattaché.e.s. Il s'agit dans un deuxième temps de tracer les grandes lignes des perspec-

tives scientifiques qui s'ouvrent à elle. Enfin, dans une dernière section, seront identifiés quelques difficultés et enjeux auxquels les recherches qui s'inscrivent dans son périmètre se trouvent confrontées.

I. Le périmètre d'action de la CID 53

A. Une conception forte de l'interdisciplinarité

La CID 53 est une commission interdisciplinaire : elle a vocation à proposer le recrutement de chercheurs et de chercheuses dont le parcours et/ou le projet de recherche présente un caractère interdisciplinaire attesté. Cependant, il existe de multiples façons de concevoir l'interdisciplinarité, de même que les indicateurs permettant de juger du caractère interdisciplinaire d'un projet de recherche peuvent varier selon les disciplines d'origine des candidats. Aussi la question du périmètre de la CID 53 est-elle l'objet d'un débat constant en son sein. Plutôt que de conduire à une définition rigide de l'interdisciplinarité, ce débat a permis de préciser, de manière itérative, ce qui peut être attendu des recherches pour qu'elles s'inscrivent pleinement dans le périmètre de cette CID. À cet égard, l'expérience acquise au cours des trois dernières années de fonctionnement de cette commission permet de mettre en avant trois éléments.

(i) En premier lieu, bien qu'elle soit pilotée par l'InSHS, la CID 53 est une commission commune à tous les instituts du CNRS. De ce fait, elle est ouverte à toutes les disciplines, que celles-ci relèvent des sciences de la nature, des sciences formelles, ou des sciences humaines et sociales. Le type d'interdisciplinarité que la CID 53 cherche à promouvoir doit impliquer et favoriser un dialogue entre des

disciplines relevant de l'InSHS et des disciplines intégrées dans d'autres instituts. Ainsi, une recherche mobilisant les apports de plusieurs disciplines des SHS (la sociologie et l'histoire par exemple), bien qu'elle présente un caractère interdisciplinaire, n'entre pas dans le périmètre de cette CID. À plus forte raison, une recherche qui demeure ancrée dans un seul champ disciplinaire des SHS (histoire, philosophie, sociologie, droit, etc.), ne correspond pas non plus aux attentes de la CID 53, et cela même si l'objet de recherche considéré porte sur les « méthodes, pratiques et communications des sciences et des techniques ».

(ii) S'inscrire dans une démarche interdisciplinaire, au sens où l'entend la CID 53, suppose donc de montrer une capacité à se saisir d'objets habituellement appréhendés par d'autres sciences, pour enrichir leur analyse et intéresser les communautés concernées. Pour les candidat.e.s relevant d'une discipline des SHS, cela implique de sortir d'une position périphérique par rapport aux productions scientifiques et aux dispositifs techniques et de ne pas se contenter d'étudier, comme c'est encore souvent le cas, la manière dont ils sont diffusés, perçus ou reçus par la société. Il s'agit plutôt d'entrer de plain-pied dans les énoncés et pratiques scientifiques ainsi que dans les dispositifs techniques eux-mêmes afin d'éclairer les enjeux sociaux qu'ils soulèvent et expliciter les hypothèses qu'ils enferment. Inversement, pour les candidat.e.s issu.e.s de disciplines qui ne relèvent pas des SHS, s'inscrire dans une démarche interdisciplinaire suppose d'être capable de renouveler la compréhension des objets et des méthodes traditionnellement considérés par ces disciplines grâce à des outils, des techniques, des concepts qui sont issus d'autres champs disciplinaires que les sciences humaines et sociales.

(iii) Ainsi, l'interdisciplinarité telle qu'elle est valorisée par la CID 53 ne correspond pas à la simple combinaison d'apports provenant de différentes disciplines dans le but d'offrir une analyse multidimensionnelle de certains objets. Elle renvoie plutôt à une démarche de confrontation, qui consiste à problématiser des pratiques et savoirs disciplinaires grâce à des méthodes ou

des concepts issus d'autres disciplines. C'est cette démarche qui est susceptible d'augmenter le niveau de réflexivité des acteurs de la recherche, de formuler de nouveaux problèmes à résoudre, voire de conduire à réorienter des pratiques de recherche. Pour ce faire, il n'est pas indispensable de bénéficier d'une double formation disciplinaire. En revanche, quelle que soit la discipline d'origine considérée, la capacité à intéresser différentes communautés scientifiques et à nourrir un questionnement au sein de ces communautés apparaît comme un critère majeur pour juger du potentiel interdisciplinaire d'un travail de recherche. Cette capacité à intéresser différentes communautés scientifiques peut être attestée par une grande variété de signes, sans que la CID n'en privilégie un en particulier. Ainsi, il peut s'agir d'interventions dans des manifestations scientifiques, de publications dans des revues intéressant une autre discipline, de participation à des projets de recherche communs, de travail au sein d'équipes pluridisciplinaires, etc.

Cette conception de l'interdisciplinarité a la conséquence pratique suivante, observée tout au long du travail d'évaluation de la CID : une bonne candidature doit permettre la discussion scientifique tant avec des membres de la CID travaillant dans des disciplines rattachées à l'InSHS qu'avec des membres venant de disciplines d'autres instituts. L'organisation de la recherche fait en effet que les chercheur.e.s sont avant tout formé.e.s dans une discipline, même si certain.e.s ont des formations académiques doubles, parfois à un niveau élevé (doctorat). Une première condition de leur recrutement est alors que leur travail soit convaincant dans cette discipline, et l'audition vise en outre à vérifier que, sans devenir pour autant spécialiste d'une autre discipline, les candidat.e.s ont développé les connaissances permettant le dialogue.

B. Éléments chiffrés pour la période 2014-2019

La CID 53 est une commission d'évaluation secondaire de 64 unités de recherche, incluant

48 UMR, 2 UMS, 1 UPR, 1 USR et 1 UPS en particulier. Elle a en charge l'évaluation scientifique d'écoles thématiques, de GDR et donne des avis sur les demandes de délégation au CNRS d'enseignant.e.s-chercheur.e.s.

77 chercheur.e.s sont rattaché.e.s à la CID 53, incluant 44 CRCN, 32 DR2 et une personne employée en CDI avec un ratio homme/femme de 1,13 (41/36). Ces chercheurs et ces chercheuses se répartissent dans des unités principalement localisées à Paris (44), Toulouse (5), Lyon (5) et Montpellier (4). Dix unités hébergent un.e unique chercheur.e rattaché.e à la CID 53. La CID 53 évalue donc périodiquement l'activité de ces chercheur.e.s. Cependant, ce rattachement à la CID est dit « secondaire », les chercheur.e.s du CNRS ayant l'obligation d'être évalué.e.s aussi par une section disciplinaire (sections 1 à 41). La majorité de ces chercheur.e.s (52/77) ont choisi une section de l'INSHS comme rattachement principal selon la répartition suivante : section 32 (1), section 33 (8), section 34 (4), section 35 (14), section 36 (10), section 37 (3), section 38 (6) et section 40 (6). Les autres chercheur.e.s rattaché.e.s secondairement à la CID 53 ont leur attache principale à l'INS2I (7), l'INSB (7), l'INSMI (3), l'INC (1) et l'INEE (1). Six personnes sont en cours de rattachement à une section principale.

Un volet très important de l'activité de la CID est cependant le recrutement de chercheur.e.s dans le cadre des concours. Sur la période 2014-2018, la CID 53 a recruté 25 chargé.e.s de recherche, soit en moyenne 5 par an, qui ont été rattaché.e.s à des sections principales de l'INSHS (22/25), à la section 6 (INS2I, 2/25) et à la section 26 (INSB, 1/25). Les sections principales de rattachement sont très majoritairement les sections 35 (7/25) et 36 (5/25) suivies par la section 37 (3/25). Les candidat.e.s classé.e.s avaient une moyenne d'âge de 35,6 ans, allant de 29 à 46 ans. L'expérience après la thèse des candidat.e.s classé.e.s était comprise entre 2 et 13 années avec une moyenne de 5,5 ans. Le ratio homme/femme est de 0,89 sur la période concernée indiquant une balance de genre positive pour les femmes. En parallèle, 19 postes DR2 ont été

ouverts à concours et pourvus sur la même période 2014-2018. Les candidat.e.s classé.e.s avaient une moyenne d'âge de 47,1 ans, allant de 35 à 58 ans. Le ratio homme/femme est de 1,44 sur la période concernée indiquant une balance de genre négative pour les femmes.

Parmi les postes ouverts aux concours des chargé.e.s de recherche entre 2014 et 2019, plus de la moitié ont fait l'objet de coloriages proposés par l'INSHS. Les thèmes privilégiés au cours de la période ont été les suivants : sciences participatives, genre, économie comportementale, aide à la décision / intelligence artificielle, changement global / transition énergétique, santé environnementale. Seulement deux thématiques prioritaires ont été proposées pour le concours DR2 au cours de la même période : « Méthodes et technologies de la recherche collaborative : co-production et partage de connaissances, Do-it-yourself, innovation par les usages » et « Études de genre : approches interdisciplinaires », laissant libre champ aux candidatures issues de toutes les sections de l'INSHS mais aussi d'autres Instituts du CNRS minoritairement.

Les thèmes retenus pour le coloriage de certains postes n'ont pas toujours permis de recruter des candidats entrant dans le profil souhaité, faute de vivier de chercheur.e.s suffisant (voir infra, 4^e partie). Si les thématiques proposées par les Instituts du CNRS pour le coloriage des postes entrent parfaitement dans le périmètre des domaines de recherche couverts par la CID 53, la commission rappelle la nécessité de disposer d'un volume important de postes non-coloriés afin de conserver la faculté de proposer des recrutements sur des thématiques interdisciplinaires innovantes qui n'auraient pas été anticipées.

II. Thématiques de recherche

Les dossiers présentés devant la CID 53 se caractérisent non seulement par une grande variété des disciplines d'origine, mais aussi

par une très forte diversité des sujets et des thématiques. Parmi ces nombreuses thématiques, certains domaines de recherche, qui se révèlent particulièrement propices à des approches interdisciplinaires ou renvoient à la problématique des sciences en société, peuvent être signalés ici, sans prétendre cependant à l'exhaustivité : non seulement les recherches de certain.e.s candidat.e.s au concours ou de chercheur.e.s rattaché.e.s à la CID renvoient à d'autres thématiques, peut-être moins fréquentes mais cependant intéressantes, mais la liste ne pourrait en aucune façon être close, dès lors que la recherche s'est toujours nourrie, et continuera de se nourrir, d'avancées permises par des innovations imprévisibles. La vocation de la CID est de privilégier des approches interdisciplinaires inattendues : toute description des thématiques de recherche est donc illustrative voire incitative, elle ne peut en aucun cas être limitative. Les huit domaines sur lesquels sera porté l'accent sont : l'internet en société ; les « fake news », rumeurs et violences numériques ; l'intelligence artificielle ; la santé ; le genre et la sexualité ; l'alimentation ; la question des frontières de l'humain ; et l'environnement.

A. L'internet en société

Le précédent rapport de conjoncture l'avait déjà souligné : la révolution numérique a des conséquences considérables, et beaucoup de travaux de recherche évalués par la CID traitent de ces conséquences.

L'émergence des technologies numériques ainsi que la production et la disponibilité croissante de grandes masses de données et de techniques de fouille et d'analyse numériques continuent de transformer le travail des chercheur.e.s en humanités et en sciences sociales. Un premier type d'innovation de la recherche peut ainsi consister à reprendre les questions classiques des disciplines des sciences humaines et sociales, et à essayer d'y répondre avec de nouvelles données ou outils méthodologiques. En effet, malgré les risques liés à l'uti-

lisation de données nouvelles dont les chercheur.e.s ne maîtrisent pas toujours l'entière chaîne de production et d'analyse, les méthodes numériques offrent une possibilité originale et féconde de renouveler l'outillage méthodologique des SHS, et notamment de dépasser la distinction classique entre méthodes qualitatives et méthodes quantitatives.

Un second type d'innovation consiste à affronter de nouvelles problématiques qui émergent du fait de l'arrivée de nouvelles technologies numériques faisant sentir leurs effets dans tous les domaines de la vie sociale : le travail, la presse, la santé, la cognition, la justice, l'État, la création artistique, la sécurité, la géopolitique, les élections, les villes ou l'espace public... La liste est longue des domaines transformés par le numérique et par l'ensemble des technologies regroupées sous l'appellation d'intelligence artificielle, y compris l'analyse de données massives, l'apprentissage ou la conduite automatique, les algorithmes, les plateformes, les modèles de décision, de prédiction ou de personnalisation, les outils de reconnaissance et de traduction, les nano et biotechnologies, les robots.

Les contributions de la recherche sur les rapports entre internet et société peuvent inclure une réflexion sur l'influence réciproque entre les technologies numériques, leurs usages et de multiples domaines de la vie en société, ainsi que sur les méthodes, infrastructures et politiques dont le développement contribue au processus de numérisation du monde. Des recherches sont ainsi attendues sur les risques et les opportunités que les technologies du numérique et de l'intelligence artificielle font courir en termes de nouvelles formes de contrôle, de domination, de discrimination et de colonisation, de surveillance, de pollution, de violence du discours, ou encore de manipulation de l'opinion (voir *infra*, sur les « fake news »). De même, des recherches devront porter sur des technologies alternatives susceptibles de minimiser ces risques et, plus généralement, sur le fonctionnement des plateformes ou des algorithmes et sur leurs conséquences sociales et environnementales. Une préoccupation transversale de recherche

en SHS concerne les technologies et dispositifs pouvant favoriser le maintien et l'émergence de conditions favorables à la fois aux libertés publiques, à la soutenabilité écologique et économique et à la justice sociale. Rappelons ici l'exigence forte du dialogue interdisciplinaire : le développement et la maîtrise de techniques en soutien de l'activité de recherche en SHS, assimilable à de l'ingénierie, ne fait pas partie du périmètre de la CID.

Les thématiques pouvant faire l'objet de recherches sont innombrables : une réflexion sur ce que les usages de diverses techniques, appréhendées dans leurs arcanes, font par exemple aux rapports de pouvoir, aux contenus de travail, à la sociabilité ou encore aux cultures, est ainsi archétypique de ce que ce type de recherches peut produire. Mais l'intérêt fort porté dans la communauté scientifique et dans les politiques de la recherche aux usages des réseaux sociaux et aux « fake news », d'une part, et à l'intelligence artificielle, d'autre part, nous conduit à développer plus particulièrement ces deux thèmes dans les deux sections suivantes.

B. Information, « fake news », diffusion d'information sur les réseaux

Les phénomènes couramment désignés par les termes de « fake news », de « complotisme », et de « post-vérité », s'ils s'imposent dans les sociétés contemporaines, restent pour l'instant insuffisamment étudiés d'un point de vue proprement interdisciplinaire. Que les travaux de recherche français ou ceux conduits dans d'autres pays soient pris en compte, ce sont en effet surtout, sur ces objets, les approches inspirées par la psychologie et les sciences cognitives (portant notamment sur les mécanismes de l'adhésion aux croyances fausses) qui prédominent. Sans être absents, d'autres travaux occupent une place moindre et ne communiquent guère les uns avec les autres : en sociologie (recherches consacrées à ce qu'Internet et

les réseaux sociaux changent dans la façon dont l'information est produite et dont elle est consommée au sein de différents groupes sociaux); en économie (travaux portant sur l'économie de l'attention et le fonctionnement des marchés de l'information); en histoire (études sur l'histoire des phénomènes de rumeur, de conspirationnisme et de désinformation) et en droit (travaux portant sur la détermination des responsabilités des plateformes et des internautes dans la propagation des fausses informations et sur les moyens juridiques de la régulation de ce secteur). Enfin, les recherches en intelligence artificielle et en programmation informatique, qui permettent de pénétrer au cœur de l'architecture interne des plateformes et d'en comprendre les incidences et les limites, se révèlent le plus souvent ignorées par les chercheurs en sciences sociales qui n'entrent pas, le plus souvent, dans la construction de ces dispositifs techniques. À ce titre, la CID 53 présente un périmètre pertinent pour juger de l'apport de ces différentes disciplines à l'analyse des phénomènes mentionnés ici, et pour croiser leurs perspectives.

On indiquera, à titre d'exemples, deux directions de recherche qui pourraient être retenues pour construire ce dialogue interdisciplinaire. La première, inspirée par l'approche économique, consiste à faire l'hypothèse que si le marché actuel de l'information souffre d'inefficiences – dont « fake news » et complotisme seraient les révélateurs –, c'est en raison des très fortes « asymétries d'information » qui séparent sur ce type de marché les producteurs et les consommateurs. Le programme de recherche dès lors ouvert vise à obtenir une meilleure compréhension des mécanismes à travers lesquels les consommateurs, malgré ces asymétries d'information, identifient la qualité et la crédibilité des nouvelles qui leur sont communiquées. Il doit aussi permettre, grâce à cette meilleure compréhension, d'ouvrir la réflexion sur d'éventuelles remédiations aux « asymétries d'information sur l'information » (si on peut les appeler ainsi) qui, d'après l'hypothèse de départ, sont à l'origine de l'inefficacité actuelle de ces marchés.

La seconde thématique, inspirée cette fois de la démarche sociologique, consiste à s'interroger sur les effets politiques et sociaux du développement des nouvelles technologies de l'information – Internet, réseaux sociaux, recours aux algorithmes. En effet, s'il est clair que les technologies ne déterminent pas *directement* les comportements, il importe néanmoins de comprendre comment elles offrent aux individus des moyens inédits d'agir et de penser et plus encore peut-être, de comprendre comment ces possibilités nouvelles sont validées et orientées collectivement au sein des groupes d'appartenance (groupe de pairs, famille, groupe professionnel, parti politique...). À travers cette compréhension, il devient possible de mieux anticiper les effets (qui peuvent être inattendus ou contre-productifs) qu'ont sur les populations-cibles les politiques (répressives, éducatives, préventives...) que les pouvoirs publics mettent actuellement en place pour tenter de contrer le phénomène des « fake news » et du complotisme. Ce type de recherches est particulièrement attendu dans des domaines aussi importants que la santé, la sécurité ou encore l'environnement.

C. Intelligence artificielle et algorithmes d'apprentissage automatique profond

Le développement des algorithmes d'apprentissage automatique profond, la disponibilité des données dans un monde toujours plus connecté et l'accroissement des moyens de calcul ont conduit ces dernières années à une amélioration spectaculaire de l'accomplissement par des moyens informatiques de diverses tâches (classement, prédiction, etc.) relevant souvent d'activités perceptives (en particulier la vision et la reconnaissance de la parole) mais ne se limitant pas à cela (on peut mentionner par exemple la traduction automatique). Les systèmes d'intelligence artificielle obtenus ont ainsi été mobilisés ces dernières années dans des applications concernant une palette très large de domaines et touchant à

tous les secteurs d'activité (santé, transport, vente, etc.).

Ces nouvelles technologies ont déjà et devraient avoir à l'avenir un impact important sur notre vie quotidienne, entraînant bon nombre de bouleversements. Des recherches interdisciplinaires sont donc attendues pour en étudier les effets sur le marché du travail, dans la vie démocratique, dans les loisirs ou encore dans les pratiques de soin.

Parallèlement, les médias livrent souvent une version de l'IA où il est question de transhumanisme et de singularité. Souvent éloignées des avancées réelles de la science, ces représentations de l'IA et plus encore ce qu'elle produit socialement (réactions technophiles ou technophobes, évolutions du rapport aux sciences et aux techniques) sont aussi des objets pour des recherches interdisciplinaires.

À la frontière entre sciences du numérique et SHS, les technologies de l'IA à base d'apprentissage automatique et de sémantique distributionnelle bouleversent les sciences du langage. Les systèmes de traduction automatique les plus performants à ce jour s'appuient sur ce genre de méthodes, pilotées par les données. La prise en compte de connaissances linguistiques dans de tels systèmes est une piste intéressante à explorer pour aboutir à des systèmes plus robustes.

Très utiles pour interroger l'amont des innovations, les recherches interdisciplinaires le seront tout autant pour travailler, en aval, sur les évolutions des usages, dans une perspective sociologique : comment les contenus de travail et les rapports au travail, ou encore la vie sociale, la convivialité et les loisirs, sont-ils modifiés par la numérisation croissante du quotidien et les usages de l'IA? Quelles compétences les nouvelles générations, formées avec ces outils, développent-elles?

La question de la responsabilité des décisions prises par des systèmes d'IA devra être abordée par les juristes. Si une voiture autonome crée un accident, qui devra être considéré comme responsable? Si des données biaisées sont utilisées dans un apprentissage algorithmique, produisant ainsi un outil discri-

minant (par exemple sur la base du genre), comment une telle situation peut-elle être appréhendée au croisement de questions juridiques et éthiques et de contraintes techniques? Plus généralement, les philosophes devront s'emparer des questions éthiques qui se poseront quand des décisions importantes et touchant à l'humain seront posées par des systèmes d'IA.

L'explication des prédictions réalisées par les systèmes d'apprentissage automatique est une problématique centrale, au cœur de l'IA d'aujourd'hui et un autre sujet important auquel les chercheurs en SHS devront s'atteler. Le règlement général sur la protection des données (RGPD) qui s'applique depuis le 25 mai 2018, précise, en effet, dans ses considérations liminaires que « en tout état de cause, un traitement de ce type [automatisé de données à caractère personnel] devrait être assorti de garanties appropriées, qui devraient comprendre [...] d'obtenir une explication quant à la décision prise à l'issue de ce type d'évaluation et de contester la décision ». La trace du fonctionnement d'un algorithme de classement ou de prédiction constitue de facto une explication du classement obtenu ou de la prédiction réalisée. Pour autant, le plus souvent, cette explication n'est pas intelligible. Étudier les applications de ce règlement et ce qu'il fait aux pratiques et au droit constitue un large champ ouvert aux juristes.

D. Santé

La santé est l'une des thématiques les plus présentes dans les dossiers examinés par la CID 53. Ce fait reflète la très forte présence de la santé dans de multiples disciplines des SHS : économie, anthropologie, histoire, droit, sociologie et philosophie. Mais, conformément à l'exigence d'interdisciplinarité qui a été exposée plus haut, les recherches sur la santé entrant dans le périmètre de la CID sont celles comportant une approche des savoirs médicaux qualifiée d'internaliste, ces savoirs pouvant être appréhendés ici dans une accep-

tion bien plus large que celle qui renverrait aux seuls savoirs de la biomédecine occidentale. De plus, l'interdisciplinarité se double souvent d'une appartenance thématique multiple, par laquelle la santé s'articule à des thématiques présentées ailleurs dans ce rapport : l'environnement (santé environnementale), le genre et la sexualité (procréation médicalement assistée, parcours de personnes transgenres...) ou encore l'alimentation (crises sanitaires, risques alimentaires et perception de ces risques, etc.). Sur tous ces croisements, les recherches devraient être fortement encouragées, car les enjeux économiques, politiques et sociaux sont considérables, et les approches interdisciplinaires plus à même d'éclairer ce qu'il se joue en la matière que des approches mono-disciplinaires.

En nous centrant ici sur la santé, nous pouvons identifier trois thématiques pour lesquelles la recherche est d'ores et déjà dynamique et féconde. La première, centrée sur les objets biologiques (maladies, virus, facteurs de risque...) a trait aux approches anthropologiques, sociologiques, géographiques et historiques des pathologies, des phénomènes morbides et du vieillissement. L'histoire des pathologies ou la sociologie des crises sanitaires, par exemple, sont des thématiques déjà anciennes. De même, l'épidémiologie produit des données sur les facteurs favorables aux maladies. Mais l'interdisciplinarité telle que la CID la défend permet une étude à la fois plus complexe et plus fine des évolutions des objets étudiés, parce que processus biologiques et sociaux interagissent très fortement dans leur construction. Les innovations de l'épidémiologie illustrent cela, à travers d'une part l'inclusion de facteurs sociaux et environnementaux dans les modèles, et d'autre part le développement d'une épidémiologie de terrain, qui mobilise les savoirs locaux de la clinique pour l'adaptation des modèles généraux à des réalités locales singulières.

Le deuxième ensemble de recherches, centrées sur les acteurs, traite du soin, des systèmes de santé et des politiques. Il s'agit là de partir des relations entre les acteurs traditionnellement étudiés par les sciences sociales de

la médecine, par exemple en histoire des systèmes de santé ou en sociologie des professions. Mais les questions posées par ces approches historiques ou sociologiques sont éclairées par une attention particulière à la science médicale. Par exemple, comment les évolutions techniques de la médecine modifient-elles les rapports soignants-soignés? La télémédecine, les promesses médicales de l'être humain augmenté ou encore la génomique constituent des axes de travail importants. Entrent aussi dans cette thématique les mobilisations d'usagers du système de santé, et leurs effets sur la recherche et sur les usages des techniques innovantes.

Enfin, même si les savoirs ne sont absents d'aucune perspective décrite ici, la troisième approche se distingue en les mettant au premier plan des interrogations de recherche. La mondialisation d'une part, et le succès des médecines alternatives ou complémentaires de la biomédecine occidentale, de l'autre, posent des questions sur la circulation des savoirs et leurs usages. L'intégration dans la médecine occidentale de savoirs vernaculaires de phytothérapie, le recours croissant, y compris à l'hôpital, à des pratiques comme l'acupuncture et l'hypnose, pose des questions sur les conditions d'usage de ces techniques de médecines qui ont longtemps été « alternatives » et deviennent parfois « complémentaires » de notre tradition thérapeutique, sur la façon dont la médecine factuelle (*Evidence Based Medicine*) parvient à les prendre en compte et, finalement, sur la façon dont s'hybrident des corpus théoriques reposant sur des conceptions hétérogènes du corps. Cette perspective peut être rattachée à tout ce qui a trait aux dimensions anthropologique, économique et juridique des innovations médicales. Par exemple, que font les innovations au droit (de la filiation, de la santé) et que fait le droit à la recherche médicale et aux innovations?

E. Genre et sexualité

Le genre est un concept et une perspective qui apparaît souvent dans les projets présentés

devant le jury de la CID 53, puisqu'il se pose dans de nombreux domaines du savoir. La politique scientifique européenne favorise cette présence non seulement dans le champ des SHS mais aussi dans bien d'autres domaines de recherche, tels que les sciences de la vie, l'IA ou la question environnementale, de même qu'elle favorise le développement des études de genre à proprement parler, qui se focalisent sur toutes sortes de pratiques sociales et symboliques, étudiant la construction des identités, individuelles et collectives, à partir des rapports sociaux de sexe.

Depuis 2010 notamment, le CNRS a fortement soutenu les études de genre et de sexualité, qui ont connu depuis lors un essor grandissant. La France a ainsi pu rattraper une partie de son retard, considérable dans ce domaine scientifique, surtout par rapport aux États-Unis et au reste de l'Europe, où ces études fleurissent depuis des décennies. Les études de genre sont souvent interdisciplinaires, puisqu'elles touchent à l'ensemble des pratiques sociales et culturelles, aussi la CID 53 leur accorde-t-elle une place importante. Cette interdisciplinarité s'est notamment matérialisée, dans les projets des candidat.e.s, par des collaborations entre des chercheur.e.s en SHS (surtout des anthropologues, des sociologues et des philosophes) et des spécialistes en biomédecine et technologie, notamment dans le cadre d'études portant sur le monde du travail et tout spécialement le travail de « care », sur la reproduction humaine (techniques et enjeux de la PMA, manipulations génétiques, traitements hormonaux, et effet de ces technologies sur la parenté et la parentalité, sur le sexe et la sexualité, facilitant les transitions entre les sexes/genres, la fluidité et donc la « performativité » du genre). Les études de genre croisent, de même, les sciences cognitives, la neurobiologie, la linguistique, les études animales – dans leur questionnement de la frontière entre l'humain et le non-humain et du clivage entre organique/machine et vivant/non-vivant –, le domaine de la création artistique et la philosophie des sciences (où les épistémologies féministes basées sur les « savoir situés » et la problématisation de la limite entre le biolo-

gique et le social ont laissé une trace profonde), entre autres.

Une deuxième caractéristique des projets autour du genre et de la sexualité est leur dimension souvent très internationale – qui se retrouve par ailleurs dans toutes les candidatures admissibles de la CID 53. L'histoire des études de genre, qui sont nées aux États-Unis mais sur des assises théoriques venant en partie de la pensée française, et leur forte circulation internationale, déterminent cette internationalisation nécessaire. Les études de genre sont par ailleurs de plus en plus attentives à l'apport que les épistémologies non-occidentales font à ce champ de recherche, ce qui devrait aussi se refléter dans les projets présentés à la CID 53.

Troisièmement, les études de genre sont en interaction avec la société et leur impact social est certain. Les inégalités hommes-femmes qui subsistent dans toutes les sociétés, même les plus attentives à cet aspect, leur imbrication avec la sexualité dans ses dimensions non seulement psychiques et « privées » mais aussi sociales et donc « publiques » (par exemple, les revendications politiques des « minorités » sexuelles) et l'entrecroisement de la domination résultant des hiérarchies basées sur le genre et la sexualité avec d'autres types de domination (de « race », de classe...) contribuent à la forte présence des questions de genre et de sexualité dans la vie sociale en France et dans le monde. Des mouvements sociaux récents à l'échelle internationale comme #MeToo ou #NiUnaMenos – ou, depuis la perspective inverse, les « croisades anti-genre » dans des pays comme la Hongrie, la Pologne ou le Brésil – ont encore intensifié cette présence, que la recherche scientifique se doit d'analyser, en se distançant de l'activisme mais sans exclure des relations fructueuses en ce qui concerne la science participative, par exemple.

F. Alimentation

À l'inverse des thématiques précédentes, l'alimentation est un sujet pour lequel les

recherches font largement défaut. Les enjeux sont pourtant considérables. Besoin vital, l'alimentation a toujours été l'objet de peurs : peur de manquer et peur d'être empoisonnés ont longtemps été les principales. Puis l'industrialisation de la production alimentaire, l'éloignement des lieux de production et de consommation provoqué par la mondialisation, et les crises sanitaires, comme celle dite de la « vache folle », ont fait évoluer ces peurs. À la peur d'être empoisonné s'est substituée une peur d'être rendu malade sur le long terme. Le réchauffement climatique et le recul de la biodiversité font réapparaître la peur de manquer, qui avait fortement régressé dans les pays riches. D'autres considérations gagnent en importance, comme celles du bien-être animal. Comment les systèmes productifs réagissent-ils aux nouvelles attentes de transparence et de traçabilité et aux nouvelles demandes éthiques des consommateurs ? Comment les consommateurs s'adaptent-ils à leur tour aux évolutions du contexte productif ? Quels sont les effets en matière de santé ? Répondre à ce type de questions suppose de conduire des recherches à la fois sur les techniques de production, sur les effets sur la santé de leurs évolutions et sur la dimension anthropologique de l'acte de manger. Pour cette raison, l'alimentation devrait constituer un thème important de recherche interdisciplinaire, à la frontière de l'anthropologie, des techniques agraires et d'élevage, de l'épidémiologie ou encore de la science politique. L'expérience de la CID montre que ce n'est pas le cas : le thème de l'alimentation est l'un des manques les plus notables dans les dossiers examinés.

G. Les frontières de l'humain

Une des thématiques émergentes dans laquelle s'inscrivent certaines des meilleures candidatures présentées à la CID 53, notamment au concours pour le recrutement de CR, mais aussi, dans une moindre mesure, à celui de DR – ce qui est révélateur de l'intérêt que les

jeunes chercheur.e.s y portent – est composée par tout ce qui touche aux frontières de l'humain. Il s'agit d'un questionnement très ancien, qui consiste à interroger ce qui constituerait « le propre de l'homme » en rapport avec les êtres appartenant à des espèces non humaines, d'un côté, et à l'opposition naturel/artificiel ou homme/machine, de l'autre. Cependant, le développement de technologies de pointe en rapport avec la santé et les capacités humaines ainsi qu'avec l'intelligence artificielle l'ont mis en évidence depuis relativement peu de temps.

Les études que certains appellent « post-humaines » – pour marquer l'historicité du concept d'« homme », variable dans le temps et selon les cultures, plus que par référence à la « fin de l'homme » – nécessitent une vraie interdisciplinarité qui ne peut se construire que par la constitution d'équipes pluridisciplinaires, composées de spécialistes en sciences de la vie (médecine, génétique, biologie, biochimie...), en sciences humaines (philosophie, avec notamment ses deux branches que sont l'épistémologie et l'éthique ; les études littéraires et artistiques, puisque souvent l'art et la littérature avancent des propositions que la science rendra réalistes plus tard, et influent sur les pratiques sociales), en sciences sociales (anthropologie, droit, psychologie cognitive, sociologie, science politique...), ainsi qu'en certaines sciences formelles comme l'informatique, avec le concours nécessaire de spécialistes en technologies de spectres divers.

Les enjeux sociaux que pose cette thématique sont importants, puisqu'elle touche à des questions cruciales comme le handicap (et en cela elle croise les *Disability Studies*) ; les maladies partagées avec des espèces non humaines (comme la « grippe aviaire » ou l'encéphalopathie spongiforme bovine, ce qui renvoie aussi à la thématique de l'alimentation) ; la manipulation génétique pour prévenir ou guérir des maladies ou à des fins reproductives ; l'utilisation de prothèses de plus en plus sophistiquées ; l'impact de l'IA et plus spécifiquement de la robotique sur le monde du travail ; le rapport des humains avec les animaux d'autres espèces (qu'elles soient domestiques – pour la

compagnie ou l'alimentation humaine – ou « sauvages »). Tout un champ d'études se développe sur ce dernier aspect : ainsi, les « études animales » traitent aussi bien de la subjectivité, des affects et des émotions animales que des affects et émotions suscités chez les êtres humains par leur interaction avec lesdits animaux.

Les questionnements scientifiques et les objets de recherche propres à cette thématique croisent souvent, par ailleurs, le domaine du genre, tel qu'il a été développé dans la section E. « Genre et sexualité ».

Ces objets de recherche étant profondément liés à des questions relevant des croyances et des idéologies, mais aussi du domaine du privé et de l'intime (notamment en ce qui concerne la famille et le corps), ils donnent souvent lieu à des débats et controverses qu'il convient aussi d'étudier. Cet impact social fort favorise également l'implication des non-scientifiques dans la recherche, dans une démarche de science participative (mettant à contribution, par exemple, des malades, des militants...) ainsi que l'utilisation de méthodes novatrices propres à la recherche-création (notamment avec la collaboration d'artistes).

Cette thématique est surtout cultivée dans les pays anglo-saxons, depuis au moins deux décennies ; plus récemment elle a connu un essor dans d'autres pays comme le Japon et la France. Le développement en France, dans les années 1960-1980, d'une pensée philosophique qui mettait en question la conception « classique » du sujet et qui a eu un rayonnement international (avec notamment Gilles Deleuze, Jacques Derrida et Michel Foucault) constitue une spécificité qui place la France dans une situation favorable pour assurer sa présence dans les équipes internationales qui travaillent sur cette thématique.

Celle-ci est très large, mais elle touche à des questions fondamentales comme la distinction humain/animal, organique/artificiel et vivant/non-vivant et devrait faire l'objet d'une attention spéciale de la part de la CID 53 et du CNRS en général : ce sont les cadres optimaux pour en assurer le développement, et elle serait plus

difficile à développer dans d'autres espaces de recherche.

H. Changement climatique

– Anthropocène

Les avancées rapides des réflexions sur le réchauffement climatique d'origine anthropique, l'effondrement de la biodiversité et plus généralement l'entrée dans ce que des chercheur.e.s de différentes disciplines ont appelé l'anthropocène, conduisent à ouvrir de nouvelles voies de recherche où une pratique forte de l'interdisciplinarité est particulièrement requise. En effet, s'il est désormais certain que l'activité humaine produit des dégâts graves et irréversibles sur l'environnement, avec des conséquences sur la santé et la sécurité physique des personnes dans de nombreuses régions du monde, ces conséquences précises constituent un champ d'investigation considérable. Or les étudier suppose d'appréhender les processus complexes qui conduisent à ces dégâts selon une triple dimension : physico-chimique, spatiale et sociopolitique. C'est pourquoi sciences du climat et de la terre et biologie, tout d'abord, géographie physique et humaine ensuite, anthropologie, économie, sociologie, histoire, philosophie ou encore droit, enfin, sont amenés à travailler ensemble dans une démarche qui s'affranchit des cadres de chaque discipline et conduit à une redéfinition des savoirs.

Il s'agit ainsi de saisir et différencier clairement les dommages subis et les risques courus par diverses populations en fonction de leur situation géographique, de leurs ressources économiques et sociales, des formes d'habitat ou encore des systèmes locaux de production alimentaire, de santé et d'éducation par lesquels leurs besoins sont (plus ou moins bien) satisfaits. Les inégalités environnementales et d'exposition aux catastrophes, les facteurs et processus de résilience des personnes et des populations, les politiques d'adaptation des systèmes politiques et sociaux à l'anthropo-

cène, les dangers que l'urgence climatique pourrait faire courir à la démocratie dans des régions du monde de plus en plus étendues sont autant de thèmes pour lesquels des travaux interdisciplinaires sont indispensables.

Surtout, et c'est par là que nous entrons au cœur du périmètre de la CID, l'anthropocène interroge les rapports sociaux aux savoirs, et notamment aux savoirs scientifiques, qui sont mobilisés dans des combats politiques, des débats et des argumentations. L'appropriation de ces savoirs par des citoyens est souvent à l'origine de mobilisations politiques et sociales dont les effets peuvent être notables tant sur les représentations des risques que sur les recherches conduites et sur les politiques suivies. Plus généralement encore, les crises environnementales et sanitaires ont provoqué des modifications des rapports à la science, qui modifient à leur tour les conditions du travail scientifique : des citoyen.ne.s attendent de plus en plus que les chercheur.e.s rendent des comptes quant aux lignes de recherche qu'ils choisissent et aux usages qui en sont ensuite faits. Les revendications d'une science plus participative, souvent partagées par des chercheur.e.s et désormais prises en compte dans des politiques de recherche, induisent de nouvelles formes de recherches particulièrement utiles pour ce qui touche à l'environnement et aux catastrophes, à l'instar du *crowd-sourcing*, qui contribue à la connaissance des évolutions environnementales selon une focale bien plus fine que ce que les observations effectuées par des scientifiques permettent. Les professionnel.le.s de la recherche scientifique et les politiques de la recherche se trouvent ainsi engagé.e.s dans des entreprises de redéfinition de leur place dans la société. Cette redéfinition est indissociablement liée à des débats et des clivages politiques portant non seulement sur le statut de la nature et le rapport de l'homme à la nature, mais aussi sur la place de l'expertise et des expert.e.s tant dans les politiques environnementales que dans les politiques de la recherche. Des recherches sur ces redéfinitions doivent contribuer à éclairer les acteurs de ces débats, dont les chercheur.e.s.

III. Difficultés et enjeux du développement de la recherche interdisciplinaire

Ce rapport se termine par une analyse des difficultés que rencontre la recherche interdisciplinaire, telle qu'elle entre dans le périmètre de la CID 53. Ces difficultés ne sont pas insurmontables mais elles devraient faire l'objet d'une attention particulière afin de favoriser le développement des travaux interdisciplinaires. En ce sens, ces difficultés sont autant d'enjeux pour la recherche promue par la CID. Elles concernent les méthodes de la recherche (A) et renvoient à des considérations plus institutionnelles (B).

A. Difficultés et enjeux liés aux méthodes de la recherche

Cette première sous-section s'attachera particulièrement aux méthodes de recherche utilisant des techniques de numérisation et d'exploration des données numériques. Sans être tout à fait nouvelles, ces méthodes connaissent un développement rapide. Cette section peut ainsi être lue en résonance avec celles traitant plus haut de l'internet en société, des « fake news » et de l'intelligence artificielle.

1. Humanités numériques et fouille de corpus

Les recherches s'inscrivant dans le vaste périmètre des « humanités numériques », déjà signalées dans le précédent rapport de conjoncture de la CID 53, poursuivent leur déploiement et ouvrent une grande variété de perspectives de recherche interdisciplinaires. Dans ce domaine, la CID 53 attend une véritable fertilisation interdisciplinaire, qui aille au-delà de la simple utilisation d'outils éprouvés

et de la constitution d'archives numériques par les SHS. Cependant, les travaux développés dans ces domaines doivent affronter une difficulté particulière : les données numériques et les outils pour les analyser sont souvent produits en dehors de l'ESR par des acteurs publics et privés dont les objectifs et les infrastructures sont parfois très différents de ceux de la recherche publique. Les données et les méthodes numériques sont ainsi souvent des ressources préexistantes, que les chercheurs empruntent et adaptent à leurs besoins. Cette réutilisation demande donc de développer une réflexion épistémologique explicite et critique sur les conditions de production des données, des traces et des outils des humanités et des sciences sociales numériques (*Critical Data Studies*). La recherche se doit alors de prendre en compte les influences réciproques entre les phénomènes observés, les infrastructures et pratiques numériques qui les sous-tendent, et les questions politiques, sociales, économiques, éthiques, philosophiques et juridiques liées à la production de données notamment personnelles, à la délégation de fonctions perceptives et décisionnelles et à la place de l'humain, du politique et de l'autonomie individuelle. Par cette évocation des questions sociétales associées à la production et l'usage des données, nous croisons ici une autre dimension, évoquée plus haut, du travail interdisciplinaire sur le numérique : l'étude d'un monde social transformé par la révolution numérique. Ainsi objets et méthodes ne peuvent-ils être distingués que par une commodité de présentation.

Parmi les techniques diverses utilisées dans ces recherches, les instruments de fouille de corpus connaissent un intérêt croissant, et tendent à prendre une place prépondérante dans les réflexions en cours qui sollicitent des approches interdisciplinaires. Ce mouvement est encouragé par l'accès sans cesse croissant aux données publiques (données de mobilité urbaine, décisions de justice...) et privées (données de connexion et de navigation, consommations d'énergies, données de santé, etc.). La mise à disposition de vastes corpus de données non-ordonnées appelle un perfectionnement des outils de fouille, auquel la recherche interdisci-

plinaire peut apporter des contributions décisives, à la charnière de l'informatique, du traitement automatique du langage, de la philologie, de la philosophie, du droit, des sciences de l'ingénieur et des sciences de la communication, principalement. Sont notamment en jeu l'identification et l'extraction d'informations pertinentes, la visualisation des données, la construction d'outils d'annotation et d'archivage permettant de naviguer au sein de corpus. La fouille de corpus au moyen d'outils numériques soulève également des questionnements politiques, juridiques et éthiques majeurs, en raison des risques qu'elle fait peser sur les droits de la personne et des possibilités de surveillance dont elle pourrait être le vecteur.

Une recherche responsable socialement peut inclure la définition de protocoles, de logiciels et d'ingénierie exportables prenant en compte les exigences du respect de la vie privée et de la sécurité tout au long du processus de conception (*privacy and security by design*), d'accès des personnes aux données les concernant, la production de conditions de laboratoire en ligne pour le recueil de données participatives ou sur la base de biens communs, ou encore la définition de procédures de sélection des données pour l'apprentissage automatique, d'explication, de classification ou d'audit pour plus d'équité, de responsabilité et de transparence.

2. Données personnelles

Depuis son entrée en application en mai 2018, le règlement général sur la protection des données (RGPD) préoccupe la communauté scientifique quant à ses conséquences possibles sur le travail d'enquête, et cela tout particulièrement en SHS. Plus que les autres sciences, les différentes disciplines de SHS (sociologie, histoire, anthropologie, études littéraires, économie, etc.) mobilisent des méthodes (ethnographie, questionnaire, observation, travail documentaire) et donc des matériaux (statistiques, entretiens, archives, etc.) qui les conduisent à produire et à traiter fréquemment des données dites à « caractère personnel ». La

définition de ce type de donnée par le RGPD est large puisqu'il s'agit selon son article 4 de « toute information qui permette d'identifier directement ou indirectement une personne ». Visant à responsabiliser les différents acteurs de la recherche, l'entrée en application du RGPD a d'abord conduit à une période de flou quant à sa portée, ses effets et les nouvelles contraintes qu'il fait peser sur les recherches en SHS. Rappelons notamment que le non-respect de cette nouvelle réglementation relève de l'infraction pénale. Afin de lever le flou et de répondre aux inquiétudes, différents acteurs de la recherche (chercheur.e.s, directeurs.trices d'unités, laboratoires, établissements et infrastructures de recherche, etc.) ont entrepris des démarches réflexives afin de clarifier les conditions dans lesquelles les recherches, notamment qualitatives, en SHS pouvaient répondre aux nouvelles exigences réglementaires. Pour autant, ces tentatives de définition d'une forme de responsabilité collective tout au long de la chaîne de collecte de données (traitement, stockage et archivage) ne prennent pas toujours en compte la façon dont les recherches interdisciplinaires se font concrètement. Cette difficulté conduit à soulever plusieurs questions. Ainsi, lors de la phase de collecte des données, l'obligation d'un consentement éclairé par écrit devient la norme. Or cette formalisation est non seulement lourde mais elle présente également le risque de miner le rapport de confiance avec les enquêtés puisque dorénavant une dimension juridique prévaut dans la relation. Quels effets ce rapport juridique peut-il avoir lorsque des recherches portent sur des controverses sociotechniques ayant des dimensions économiques et politiques fortes? En outre, certaines méthodes ethnographiques, comme l'observation participante, deviennent beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre, ce qui peut être un frein aux recherches innovantes et de terrain. De plus, les enquêtes portant en tout ou en partie sur la santé de populations, parce qu'elles impliquent des données qualifiées de « sensibles », sont dorénavant interdites ou soumises à des contraintes fortes notamment d'autorisation préalable (CNIL). Or les questions de santé sont des sujets sur lesquels nombre de

recherches présentées en CID 53 proposent leurs analyses, que cela soit sur les questions d'innovation biomédicale, sur les controverses socio-sanitaires autour de produits issus de la chimie, sur les innovations techniques numériques pour l'organisation et la gestion des soins (cf. *supra*). Si ces recherches n'impliquent pas toujours directement des données « sensibles », il est à noter que la frontière entre ce qui relève d'enquêtes portant directement sur la santé des populations et celles portant sur le domaine de la santé, par exemple sur l'organisation ou les pratiques médicales, reste sujette à interprétation. Enfin, la phase de traitement et de stockage des données de la recherche implique désormais tout un travail de mise en forme dont l'axe principal se décline entre sécurisation et anonymisation complète (ou à défaut le « pseudonymisation »). Ces exigences nécessitent non seulement des moyens non négligeables en termes de dispositifs techniques et d'outillage (crypteur, module de stockage sécurisé, etc.), mais aussi la mobilisation d'un savoir-faire spécifique dont les chercheurs ne sont pas toujours détenteurs. Une des questions est alors celle de savoir quelle formation ou quels acteurs de la recherche pourront permettre de répondre à cette nouvelle réglementation et quelles solutions peuvent être trouvées en SHS puisque, comme l'indique le guide INSHS récemment paru sur cette problématique, l'anonymisation n'est pas possible en recherche qualitative.

Plus généralement, si l'application du RGPD soulève des questions quant à la poursuite de certaines recherches interdisciplinaires, le risque est aussi qu'il soit un frein voire un obstacle à des recherches innovantes sur des terrains difficiles d'accès. Les chercheurs ne risquent-ils pas de renoncer à certains terrains, à certaines enquêtes qualitatives par anticipation de leurs possibles conséquences juridiques ou politiques? Une certaine standardisation de la recherche en SHS n'est-elle alors pas à craindre? Et si elle se produisait, quel modèle de science s'imposerait alors? Devrons-nous assister à une partition des activités de recherche entre, d'un côté, la production de données, laissée à des organismes publics ou privés accrédités et, de l'autre, leur interprétation dans un

cadre contraint? Enfin, notons que le RGPD paraît soulever deux paradoxes. D'abord, les exigences d'anonymisation qui pèsent sur la recherche, notamment en SHS, apparaissent peu compatibles avec le cadre de la Science ouverte : comment « ouvrir » des données de recherches lorsque la diffusion de données personnelles s'avère contraire à la réglementation? Ensuite, les chercheurs sont invités à publier dans des revues internationales notamment nord-américaines. Or depuis quelques années, ces revues demandent aux chercheurs qui souhaitent y publier leurs résultats d'avoir accès aux données des recherches menées afin de lutter contre la fraude scientifique. Comment alors s'assurer que cet accès et le stockage qu'il implique répondent aux exigences du RGPD?

B. Difficultés et enjeux liés à la structuration des unités de recherche et aux politiques de recherche

Malgré ses indéniables atouts, la recherche interdisciplinaire est fragilisée par la structure fortement disciplinaire de la plupart des laboratoires et a fortiori des départements universitaires, bien plus que des formations, qui deviennent de plus en plus interdisciplinaires – ce qui crée un décalage entre les attentes et anticipations de ces diplômé.e.s interdisciplinaires, et le marché du travail dans le monde de la recherche et de l'enseignement supérieur. Une autre source de fragilité est la difficulté d'obtenir des moyens de financement pour des projets à forte composante transdisciplinaire puisque, malgré les encouragements à l'interdisciplinarité, les AAP nationaux et internationaux restent très cloisonnés selon les divisions traditionnelles des domaines de recherche disciplinaires.

Cette situation conduit la CID à souligner l'importance d'une bonne continuité de la politique d'interdisciplinarité au sein du CNRS. Il est en effet indispensable que les orientations prises par l'établissement dans ce domaine

soient durablement maintenues et que les communautés de recherche disposent ainsi d'une bonne visibilité sur le cadre institutionnel dans lequel elles inscrivent leurs actions. Ce n'est qu'à cette condition que les unités de recherche et les organismes financeurs pourront prendre le risque d'orienter une partie de leur effort vers des objets et des méthodes de recherche interdisciplinaires.

De la même manière, la CID constate qu'un vivier de jeunes chercheur.e.s commence à exister dans certains des domaines qui entrent dans son champ d'activité. Dans d'autres domaines, pourtant lourds d'enjeux (comme les enjeux sociaux de l'intelligence artificielle), le vivier de jeunes chercheurs et chercheuses est plus limité, voire presque inexistant, y compris en considérant les personnes formées en dehors de France. Afin de résoudre cette difficulté et de permettre l'émergence de viviers suffisamment larges de chercheurs et de chercheuses intéressé.e.s à des travaux interdisciplinaires, il est indispensable que la politique d'interdisciplinarité soit promue par le CNRS par différents moyens, dont les CID ne sont qu'une illustration, et qu'il apparaisse clairement que cette orientation s'inscrit dans la durée.

Comme dans tout domaine de recherche, mais avec une acuité peut-être encore plus forte lorsqu'il s'agit de recherches interdisciplinaires, le développement de viviers de chercheurs et de chercheuses de haut niveau prend du temps. Dans la mesure où les communautés scientifiques sont essentiellement structurées dans le cadre des disciplines, le CNRS joue un rôle de premier plan pour permettre le développement de recherche innovantes au croisement des disciplines.

Conclusion

L'attractivité dont bénéficie la CID 53 auprès des jeunes chercheur.e.s, laquelle se traduit notamment par un nombre toujours plus élevé de candidatures au concours CRCN (plus de 150 chaque année), témoigne d'un fort engouement pour des thématiques qui, comme celles évoquées dans ce rapport, permettent d'interroger les rapports entre sciences et société et d'analyser les lourds enjeux politiques et sociaux dont le développement scientifique et technologique est porteur. Cette attractivité reflète également l'intérêt porté par des chercheur.e.s issu.e.s de disciplines très variées à de nouvelles manières de faire de la recherche, dans lesquelles le travail interdisciplinaire est conçu comme le meilleur moyen de faire progresser chaque discipline. À cette ouverture interdisciplinaire s'ajoute le plus souvent chez les candidat.e.s une ouverture internationale très marquée qui, elle, est conçue comme le meilleur moyen de contourner certaines des difficultés évoquées plus haut.

Au regard de la grande qualité de certaines des candidatures que la CID 53 a eu à examiner au cours de ce mandat, il faut souhaiter que le CNRS, dont la singularité est de rassembler un large éventail de disciplines et de réunir par conséquent les conditions particulièrement favorables à leur mise en dialogue, poursuive sa politique de soutien à l'interdisciplinarité, en particulier à travers le dispositif des CID.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES, CONCEPTS ET INSTRUMENTATION EN SCIENCES DE LA MATIÈRE ET EN INGÉNIERIE POUR LE VIVANT

Composition de la commission interdisciplinaire

Florian LESAGE (président de la commission), Emmanuelle MARIE-BEGUE (secrétaire scientifique), Lavinia BALAN, Vincent BALTER, Patrice CAMY, Jean-Luc COLL, Valentina EMILIANI, David GREMILLET, Anne-Marie HAGHIRI, Didier LASSAQUE, Sophie LECOMTE, Ludovic LECONTE, Franck PARA, Thierry PEREZ, Jean-Paul RIEU, Serge SIMOENS, Emmanuelle TREVISIOL.

Résumé

Les recherches interdisciplinaires mêlant sciences de la matière et sciences du vivant constituent un enjeu majeur. En effet de nombreux concepts et technologies issus de la recherche en physique et en chimie sont à l'origine de ruptures en biologie et en médecine. Inversement, la pression de sélection qui opère au sein du vivant a généré des systèmes hautement optimisés dont la description fournit aux non biologistes une source d'inspiration originale pour la mise au point de nouveaux procédés et de nouveaux systèmes. Ce document met en relief certains des enjeux actuels des interactions entre sciences du

vivant et sciences de la matière : biophysique, imagerie du vivant, micro et nanotechnologies, objets fonctionnalisés en interaction avec le vivant, systèmes biomimétiques et bioinspirés.

Introduction

En France, les recherches interdisciplinaires en sciences de la matière et du vivant constituent un champ dynamique qui a

dépassé le statut de l'émergence et se déploie de façon pérenne sur une communauté dotée d'une excellente visibilité internationale. Porteur d'innovations majeures, ce domaine est en constante évolution. Quasiment tous les secteurs des sciences dites dures sont concernés. Une trentaine de sections du comité national peuvent potentiellement contribuer à ce domaine.

Au-delà des progrès initiaux obtenus en santé publique (imagerie médicale, radiothérapie), ce domaine de recherche s'établit aujourd'hui autour d'une démarche bien plus globale : appréhender à l'aide d'outils conceptuels et matériels physiques ou chimiques les questionnements de la biologie, et en retour, intégrer les fondements fonctionnels et structurels de la matière vivante dans les outils de la physique, de la chimie et de l'ingénierie afin de générer de nouveaux concepts et de nouveaux outils.

Un corolaire plus récent à ces approches est de mimer le monde du vivant, dans tous ses niveaux d'organisation, par des approches non biologiques afin d'imaginer de nouvelles architectures fonctionnelles et de réexaminer, à la lumière de ces acquis, les modes d'organisation et de fonctionnement du vivant. Par l'optimisation acquise au cours de l'évolution, le vivant se révèle également une remarquable source d'inspiration pour répondre de manière originale aux nouveaux enjeux sociétaux concernant notamment la production d'énergie, la sobriété et la durabilité.

Ce document met en relief des domaines essentiels de la recherche en concepts et instrumentation en sciences de la matière et en ingénierie pour le vivant. Ces domaines constituent des enjeux majeurs pour progresser dans la compréhension du vivant, pour développer les futurs outils de diagnostic, de suivi thérapeutique ou d'observation environnementale, et pour favoriser les évolutions technologiques majeures que constituent les approches bioinspirées.

I. Biophysique et biomécanique

A. Un vaste domaine de recherche

La biophysique et la biomécanique sont représentées dans plusieurs sections du comité national : sections 5 (INP) et 11 (INC) pour l'interface physique-biologie ; sections 9 et 10 (INSIS) pour la mécanique des systèmes vivants, section 22 (INSB) pour la biophysique cellulaire, le développement et la morphogénèse ; et section 28 (INSB/INSIS) pour l'ingénierie pour la santé.

Si ces thématiques ont pris de l'importance dans ces sections (nous renvoyons le lecteur aux chapitres correspondants), elles n'en sont généralement pas le cœur, car les questions scientifiques abordées, les démarches et les chercheurs impliqués sont souvent marqués par l'attachement disciplinaire propre à chaque section. Les travaux de biophysique et biomécanique que soutient la CID 54 impliquent des objets ou des systèmes biologiques de complexité croissante et de taille variable (cellules hautement spécialisées, populations cellulaires organisées, tissus ou organismes vivants, sains ou pathologiques, incluant systèmes sensoriels, musculo-squelettique, encéphalique), ce qui nécessite une interaction étroite entre un nombre croissant de disciplines. Un challenge fréquent est de réussir le couplage des techniques complémentaires, intrusives ou non, pour des diagnostics et des études plus intégrées. Quelques exemples sont présentés dans le paragraphe suivant.

Si plusieurs pôles de recherche interdisciplinaire adossés au CNRS (UMRs) se sont constitués, notamment en région parisienne, de nombreuses équipes oeuvrent dans des unités centrées sur d'autres disciplines. Le besoin de structuration est manifeste et s'appuie sur deux GDRs : pour la biophysique, en

lien fort avec la communauté des physiciens de la matière condensée et de la matière molle, le GDR 3070 *Physique de la cellule aux tissus* (CellTiss), rattaché à l'INP, l'INC et à l'INSB; pour la biomécanique, en lien fort avec la communauté de la mécanique et de l'ingénierie, le GDR 3570 *Mécanique des matériaux et fluides biologiques* (MECABIO) rattaché à l'INSIS et à l'INSB. Par ailleurs, d'autres GDRs, rattachés à l'INP et/ou l'INSIS, participent de cette dynamique, en particulier le GDR *MicroNanoFluidique* et le GDR 3588 *Mécanique et physique des systèmes complexes* (MÉPHY).

Cette dynamique de recherche a conduit à la formation de chercheurs de qualité, maîtrisant le langage, les concepts et les outils de champs disciplinaires différents et parfois capables de combiner expérimentation et modélisation numérique de pointe. Ce niveau d'interdisciplinarité est souvent le résultat de parcours atypiques, parfois relativement longs, associant des expériences successives de recherche dans des environnements variés (équipes à dominante sciences de la matière puis à dominante sciences de la vie et vice versa, équipes ayant développé une forte culture interdisciplinaire). Cette dynamique a entraîné l'émergence de formations originales au niveau master mêlant la physique, la biologie et même les mathématiques. Tout cela a conduit à constituer un vivier d'excellents candidats au CNRS, vivier dont la taille est en constante augmentation depuis quelques années.

B. Quelques exemples typiques

L'évolution du domaine amène aujourd'hui à aborder des problématiques complexes tant dans la diversité des objets biologiques que par les techniques d'études, les sollicitations mécaniques, les conditions physico-chimiques et/ou l'interaction entre un nombre croissant de disciplines. Les recherches concernent les cellules souches, les cellules spécialisées ou réactives (ovocytes, cellules immunes, neurones, cellules ciliées) mais aussi les populations cellulaires organisées, telles que les biofilms, les

agrégats, les sphéroïdes, les tissus *in vivo* et *in vitro*, et les organismes vivants ou les groupes d'animaux. Les techniques expérimentales d'exploration et d'observation sont dans la majorité des cas associées à des approches théoriques de modélisation et de simulation numérique. Très souvent dans ce domaine, la CID 54 et la CID 51 sont intimement associées.

Il est difficile de décrire cette dynamique de façon exhaustive mais une liste réduite à quelques sujets de recherche récents présentés à la section permet d'appréhender la richesse des thèmes abordés :

- contrôle de la différenciation cellulaire dans des assemblées de cellules par la libération localisée de drogues grâce à la microfluidique ;

- étude de la motilité cellulaire dans diverses géométries plus réalistes que la culture en 2D sur boîte de Petri (gels 3D, canaux 1D...), avec contrôle des gradients de chimioattractants ou de la rigidité du milieu, sur des types cellulaires variés (cellules mésenchymateuses, immunitaires ou invasives) ;

- étude des mouvements morphogénétiques par suivi des mouvements cellulaires (tracking) couplé à la mesure locale des contraintes mécaniques, pour évaluer les rôles respectifs des morphogènes et de la mécanique dans l'embryogenèse ou le cancer, que ce soit en systèmes 3D (organoïdes, explants, embryons) ou 2D (monocouches épithéliales ou endothéliales) ;

- étude des mouvements collectifs dans un biofilm, une monocouche ou un tissu, éventuellement couplé à du *machine learning*, afin d'en estimer le caractère normal ou pathologique. La convergence des outils expérimentaux et de modélisation issus de la matière active (physique hors d'équilibre) peut ici s'avérer très fructueuse ;

- mesure des forces impliquées durant la division cellulaire symétrique ou asymétrique, dans les phénomènes de fusion membranaire entre deux gamètes pour améliorer la connaissance de la fécondation à l'échelle moléculaire ;

– identification des composants minimaux de processus cellulaires basiques tels que motilité, fusion ou fission membranaire par des approches biomimétiques faisant intervenir matière molle (systèmes auto-assemblés), biochimie (purification), optique (microscopies innovantes), microtechnologies (pinces, microfluidique...) et modélisation ;

– observation simultanée des signaux issus de l'activité d'un grand nombre de neurones à l'aide d'une grille de capteurs montés sur des supports organiques transparents, couplée à des techniques d'imagerie multiphotonique pour une meilleure observation corticale.

II. Imager le vivant

La France est dotée d'une recherche de pointe performante en imagerie, de réputation internationale. La thématique la plus développée est l'imagerie du vivant, que ce soit pour décrypter ses mécanismes ou pour améliorer la santé. Elle mobilise des moyens importants à la croisée de nombreuses disciplines dont les sciences physiques, chimiques, biologiques, médicales, l'ingénierie et les sciences du numérique, offrant ainsi un bel exemple d'une interdisciplinarité féconde en découvertes et en transferts de technologies.

La recherche nationale s'appuie sur une communauté relativement bien développée et structurée autour des infrastructures de recherche (*France Life Imaging* et *France Bio-Imaging*, FBI) qui permettent de regrouper les laboratoires en nœuds régionaux et transverses de qualité scientifique et technologique reconnue. De plus FBI est le nœud français de *Euro Bio Imaging*. Il existe également le domaine d'intérêt majeur *Technologies Innovantes pour les Sciences de la Vie* d'Île de France (DIM ELICIT) et deux GDR, *Imagerie et Microscopie en Biologie* et *Imageries in vivo*, pour l'imagerie biomédicale préclinique et clinique, qui regroupent autour de projets transverses une large communauté de biologistes, physiciens,

mathématiciens, chimistes... Ces regroupements permettent de fédérer au-delà du CNRS des laboratoires universitaires, Inserm, CEA, INRIA, INRA.

L'imagerie optique, très largement utilisée en biologie, est aujourd'hui mise au défi de surpasser ses performances. Elle doit notamment permettre de quantifier des phénomènes et des objets physiques, chimiques et biologiques intriqués et complexes, avec une haute résolution temporelle et spatiale, et à de multiples échelles, de la molécule unique à l'organisme entier. Cela a conduit à l'émergence de nouvelles techniques de microscopie de pointe, pour lesquelles les laboratoires français ont produit des contributions de premier plan. Ces avancées technologiques génèrent des quantités massives de données (bigdata), ce qui pose le problème du stockage des données mais aussi de leur analyse pour l'imagerie 5D.

L'imagerie médicale qui est traitée spécifiquement par la section 28 n'est pas décrite ici.

A. Instrumentation et innovations technologiques

La microscopie non linéaire à deux photons a ouvert la voie de l'imagerie en profondeur dans les tissus. La technique a récemment été étendue à trois photons ouvrant l'accès à des profondeurs plus importantes qui permettent d'envisager à court terme l'imagerie du cerveau à travers la boîte crânienne. Pour atteindre des profondeurs encore plus importantes (de l'ordre de plusieurs millimètres), les développements récents s'articulent autour de l'ingénierie de front d'onde qui permet de focaliser en profondeur la lumière diffusée, et la microendoscopie pour la focalisation en profondeur dans les tissus grâce aux micro-objectifs. Les défis majeurs concernent le développement de sondes de taille de plus en plus réduite pour diminuer le caractère invasif et dommageable des implants. Une direction prometteuse est l'utilisation de fibres multimodes couplées aux techniques de contrôle de front

d'onde afin de s'affranchir des micro-objectifs et d'évoluer vers une endoscopie sans lentille.

Outre sa capacité à imager en profondeur, la microscopie non linéaire permet de combiner la détection de plusieurs signaux pour visualiser sans marquage des structures dans un tissu intact. La génération de seconde harmonique (SHG) permet de détecter les zones denses et non centro-symétriques (collagène fibrillaire, filaments de myosine...). La génération de troisième harmonique (THG) quant à elle détecte les hétérogénéités optiques à l'échelle de la centaine de nanomètres (interfaces intra/intercellulaires, structures lipidiques ou pigmentées...). Les contrastes Raman cohérents (SRS, CARS, etc.) présentent une spécificité chimique (lipides, eau, protéines, etc.). Ces techniques ont un grand avantage, elles permettent de se passer de marquage. On peut de surcroît combiner ces méthodes à des approches polarimétriques pour sonder l'orientation des structures détectées à l'échelle du volume d'excitation.

L'acquisition d'image peut être accélérée de deux à trois ordres de grandeur par rapport à l'approche usuelle point-à-point en utilisant la microscopie à feuille de lumière (light-sheet microscopy). Elle peut aussi être couplée à la super résolution ou à l'excitation multiphotons. Cette approche suscite un grand intérêt en biologie pour l'imagerie *in vivo* et *in toto* d'embryons (poisson zèbre, nématode, drosophile...) ou combinée à la nouvelle technique pour rendre transparents (technique dite de «transparisation») des échantillons épais, tels que les cerveaux de mammifères intacts.

Pour les échelles encore plus petites (sub-micrométrique), ces dernières années ont été marquées par des avancées majeures en microscopie optique super résolue qui permet de franchir la limite de diffraction et d'atteindre des résolutions nanométriques. Plusieurs techniques complémentaires le permettent aujourd'hui, par exemple les microscopies STED, PALM, SIM et STORM. Les principales applications ont été réalisées en biologie cellulaire, en particulier sur des systèmes cellulaires isolés. Très récemment, cette approche a été utilisée *in vivo*.

L'utilisation de la lumière en biologie ne se limite pas à l'imagerie des tissus. Un nouveau domaine appelé optogénétique est en train d'en élargir les contours. Cette méthode permet de contrôler par la lumière l'activité de neurones génétiquement modifiés produisant des protéines photo-activables (les opsines). Cette approche a révolutionné le champ des neurosciences, et combinée à l'utilisation d'indicateurs d'activité neuronale (sondes calciques ou de potentiel) elle a ouvert la voie à la manipulation optique des circuits neuronaux afin d'étudier leur rôle dans la détection sensorielle, la perception et les fonctions cognitives. Les développements dans ce domaine sont relatifs à l'amélioration de la résolution spatiale et temporelle pour contrôler individuellement des centaines de cellules sur une échelle temporelle de la milliseconde et dans des volumes millimétriques. Cela implique la combinaison de méthodes d'illumination fondées sur la modulation du front d'onde, l'excitation multiphotons mais aussi le développement de nouvelles opsines et des lasers IR puissants.

La microscopie corrélative cherche elle à fusionner les informations obtenues par différentes modalités d'imagerie sur un même échantillon (par exemple microscopie électronique et photonique). Cette modalité permet de situer des mécanismes moléculaires observés en microscopie de fluorescence puis localisés au niveau structural par la microscopie électronique.

Le développement de nouvelles méthodes optiques pour la biologie et plus particulièrement pour les neurosciences, est aujourd'hui un domaine en très forte expansion. Le modèle de la *BRAIN Initiative* américaine, dont s'inspirent aujourd'hui d'autres pays comme le Japon, l'Australie ou la Corée a permis la création aux États-Unis d'une large communauté interdisciplinaire regroupant des compétences complémentaires en photonique, nanoscience, biologie moléculaire, chimie, et neurosciences. Plusieurs équipes françaises sont aujourd'hui parmi les leaders mondiaux dans ces différents domaines mais les interactions entre elles restent limitées, ce qui empêche la formation d'une vraie commu-

nauté interdisciplinaire en France et donc de rester compétitifs au niveau international.

B. Thérapies guidées par l'imagerie, thérapies assistées par agents d'imagerie

L'utilisation des ondes en thérapie est prometteuse : ablation des tissus par hyperthermie ultrasonore (adénome de la prostate, fibrome utérin, nodules mammaires...) ou par radiofréquence (troubles du rythme cardiaque), sonoporation pour le transport transmembranaire d'un principe actif ou pour la thérapie génique, ouverture de la barrière hémato-méningée, activation d'une molécule par la lumière (photothérapie dynamique), manipulation par champs magnétiques de cellules chargées par un agent magnétique (thérapie cellulaire), activation de particules thermosensibles... Le contrôle de la thérapie par l'imagerie suscite des méthodes originales par couplage multi-ondes, comme par exemple les ultrasons focalisés contrôlés par IRM (*MRI-guided FUS*) où les ultrasons chauffent les tissus et l'IRM contrôle l'élévation de température. Plusieurs entreprises françaises sont à la pointe de ces développements sur un marché très prometteur.

Les techniques de focalisation adaptative, notamment fondées sur le principe du retournement temporel, permettent de focaliser les ondes ultrasonores à travers des structures osseuses avec une précision millimétrique. Cela ouvre l'accès à la résection transcrânienne de zones tumorales cérébrales ou de zones épileptogènes, ou encore au rétablissement du fonctionnement de circuits de neurones défectueux par la méthode de stimulation des structures cérébrales profondes (épilepsie, tremblements essentiels...).

La lumière peut aussi être utilisée pour l'imagerie profonde non-invasive, en particulier chez le petit animal. Ces méthodes sont en plein essor chez l'homme. Des longueurs d'ondes dans l'infrarouge (Near-Infrared (NIR), Short Wave Infrared (SWIR) ou Mid-Infra red

(MIR)) sont utilisées soit en mode réflexion, soit en transmission, et peuvent être couplées à la spectroscopie. En complément de méthodes telles que l'OCT (optical coherence tomography) ou le Raman, ces nouvelles méthodes permettent d'améliorer le diagnostic et la thérapie de pathologies chroniques dont le cancer. Des développements récents permettent de cartographier des tissus de façon non-invasive sur la base des contrastes endogènes, ou d'améliorer la qualité des gestes chirurgicaux. De plus, l'absorption de l'énergie lumineuse par les tissus traversés peut aussi induire la production d'ultrasons détectables en échographie, définissant le domaine de l'imagerie photoacoustique (ou opto-acoustique).

III. Micro et nanosystèmes pour la biologie et le vivant

Les micro/nanodispositifs bioanalytiques sont destinés à identifier l'analyte cible au sein d'un liquide biologique complexe (concentration, purification, immobilisation, tri, culture...) avec des seuils de détection ultra-sensibles, c'est-à-dire bien en deçà du femtomolaire. Les futurs systèmes seront multifonctionnels, plus complexes, plus intégrés et plus intelligents ; ils offriront à terme des solutions très performantes pour le diagnostic et le suivi thérapeutique ou de l'environnement, répondant ainsi à des attentes sociétales majeures. Pour cela, les défis scientifiques actuels consistent à trouver les bons matériaux pour les incorporer au sein des capteurs, à les fonctionnaliser de manière optimale, tout en développant des outils de traitement rapide des données multiplexées avec transfert sans fil. Les développements technologiques permettent déjà un passage de *in vitro* à *in vivo*, grâce à l'utilisation de matériaux biocompatibles et à des architectures moins invasives. L'ensemble de ces approches constitueront à terme un accélérateur de la recherche médicale, tout en proposant une meilleure compré-

hension des mécanismes fondamentaux à l'échelle cellulaire ou moléculaire.

A. Biocapteurs

Il s'agit d'un secteur typiquement interdisciplinaire où la chimie de surface se combine à la physique (optique, microélectronique), à la biologie, à la bio-informatique et au biomédical. Au cours des deux dernières décennies, le développement de capteurs fondés sur des phénomènes optiques (résonance plasmonique de surface, interférométrie), électriques et mécaniques a grandement contribué à l'amélioration de leur sensibilité et spécificité, à la baisse de leur coût, en facilitant le criblage haut débit. Le développement de prototypes portables est en pleine explosion. Le défi est de réaliser des dispositifs compacts, autonomes et automatiques capables d'analyser avec fiabilité des échantillons environnementaux, cliniques, vétérinaires, pathologiques ou médicaux dans des conditions difficiles, sur le terrain, en continu (temps réel) et dans les milieux ambiants (l'air, les fluides corporels, la nourriture...), peu coûteux, rapides, stérilisables et réutilisables.

B. Laboratoires sur puce

Le domaine des laboratoires sur puce constitue, depuis son origine, un domaine d'application très important de la microfluidique. Construits avec pour objectif ultime l'intégration complète de la chaîne analytique, ils contribuent à répondre à un besoin grandissant d'analyse automatique, reproductible, rapide et à bas coût. Le potentiel de miniaturisation de ces systèmes et leur richesse fonctionnelle favorisent le rapprochement des sites d'analyse et de prélèvement ouvrant ainsi un champ d'utilisation extrêmement vaste (chez le praticien, au lit du patient, en environnement isolé ou défavorisé...). L'inflexion récente des demandes pour des dispositifs souples a sus-

cité une transition importante, consistant à introduire de façon massive la matière organique, voire biologique, dans les filières micro et nanotechnologiques : couches moléculaires auto-assemblées, copolymères à blocs, substrats à dureté variable façonnée, matériel génétique auto-organisé en origami ou organisé par assemblage spécifique (ADN / aptamères-protéines), vésicules (hydrogels, polymères, lipides...), nanoparticules multifonctionnelles. Ce sont autant d'outils qui alimenteront la recherche dans les années à venir.

C. Cellules/organes sur puces

Un des champs d'application particulièrement actif porte sur la possibilité de créer des microenvironnements adaptés à la culture cellulaire. Conçus à l'origine en 2D, ces dispositifs microfluidiques évoluent vers la 3D permettant ainsi de coupler chambres de culture cellulaire et chambres d'alimentation du milieu, intégrant (ou non) des capteurs pour un suivi en temps réel (de la teneur en oxygène par exemple...). Sur le plan technologique, on note une émergence des techniques de lithographie 3D et de bioimpression qui permettent de créer des microstructures 3D dans des biopolymères (microenvironnements originaux) facilement intégrables dans des puces fluidiques. Augmenter le niveau d'intégration permettra de satisfaire à de nouvelles exigences fonctionnelles. Par exemple, il devient possible de suivre le caractère invasif d'un cancer primitif en observant comment l'environnement peut affecter le développement d'un sphéroïde de cellules tumorales. Moduler le microenvironnement par différentes méthodes (ajouts de molécules chimiques, irradiation localisée...) autour d'amas cellulaires ouvre la voie à une meilleure compréhension des mécanismes au niveau cellulaire, comme par exemple les mécanismes de différenciation de cellules souches. En neurosciences, la possibilité de cultiver des neurones dans des environnements avec une topographie contrôlée permet d'étudier à la fois des mécanismes de propagation (en virologie, en thérapeutique) mais aussi

d'étudier la connectivité et la plasticité neuronale. Ces dispositifs microfluidiques, qui permettent de manipuler de manière contrôlée des assemblées de cellules, sont communément appelés *organs-on-chip*. Ils ouvrent un nouveau domaine de recherche fondamentale pour la compréhension de la biologie à l'échelle cellulaire, qui aura des retombées majeures, par exemple dans le domaine de la médecine régénérative qui vise à générer des organes et des tissus spécifiques à partir de cellules souches. Comme pour toute nouvelle technologie, il sera nécessaire de mettre au point, tester, optimiser et valider scientifiquement et réglementairement ces dispositifs pour en faire des outils au bénéfice du patient.

IV. Molécules et objets fonctionnels en interaction avec le vivant

Ce chapitre présente un aperçu non exhaustif des outils chimiques et écologiques développés pour sonder le vivant à l'échelle de la cellule, de l'organisme ou d'une population. Dans certains cas, la sonde est un simple rapporteur des phénomènes observés ; dans d'autres cas, elle est conçue pour agir sur son environnement, à des fins de compréhension ou curatives, ou encore au service de la biologie synthétique.

A. Molécules en interaction avec le vivant

Parmi les molécules utilisées en imagerie *in vivo*, nous pouvons distinguer les sondes directement détectables des agents de contraste, qui augmentent artificiellement le contraste entre une structure anatomique (un organe ou une tumeur) et les tissus voisins. Dans les deux cas,

les travaux menés par les chimistes visent à améliorer la solubilité ou la dispersion du composé dans les milieux biologiques, sa stabilité et son innocuité *in vivo* ainsi que son efficacité en tant qu'agent pour l'imagerie. L'utilisation de méthodes de synthèse plus propres permet de limiter la concentration en solvant ou en catalyseur résiduel, ces composés ayant souvent un impact négatif sur le vivant. Par ailleurs, un ciblage efficace des composés sonde par le biais d'anticorps, de ligands, ou de peptides de reconnaissance, est souvent recherché.

Les recherches portent notamment sur le développement de molécules fluorescentes photo-stables et absorbant à une longueur d'onde dans l'infrarouge pour l'imagerie optique, et sur la synthèse de chélateurs performants permettant d'éviter une trans-métallation (échange de métaux) ou une trans-chélation (échange de ligands) *in vivo*. Dans le domaine de l'IRM, par exemple, les métaux concernés sont le gadolinium et le manganèse d'une part, et les lanthanides d'autre part (agents CEST et PARACEST). Les chimistes s'intéressent également au marquage de biomolécules par des radionucléides à temps de demi-vie court (typiquement ^{11}C ou ^{18}F) pour la tomographie par émission de positrons.

La tendance actuelle est d'aller vers des constructions plus complexes, permettant de conjuguer sur un polymère ou une biomolécule une molécule de reconnaissance et un ou plusieurs agents de détection pour permettre une analyse multimodale et ciblée *in vivo*. Ces travaux sont rendus possibles par une expertise forte des laboratoires français en méthodes de couplage orthogonales rapides et sélectives.

Un dernier point concerne l'élaboration de molécules sondes capables de réagir *in situ* à des événements biologiques spécifiques (réaction enzymatique, variations de pH ou de température, présence d'espèces oxydantes...) en induisant l'apparition ou la disparition d'un signal par exemple par quenching de fluorescence, ou libération d'une molécule sonde. L'objet chimique peut également être conçu pour libérer une molécule active qui va interférer avec le processus biologique à des fins de

compréhension ou curatives (approche « pro-drug »); la libération peut se faire par action enzymatique ou par une activation physique telle que la lumière, les rayons X ou les ultrasons focalisés. Il est aussi possible de définir des objets capables d'interagir chimiquement *in vivo* afin de générer une nouvelle activité (chimie click, hybridation...).

B. Objets colloïdaux pour l'imagerie et le théranostic

Les objets colloïdaux particuliers sont utilisés en tant que plate-forme de diagnostic *in vitro*. L'enjeu actuel est de réaliser des analyses à grande échelle, en parallèle, le plus rapidement possible (high throughput) et de détecter des quantités toujours plus réduites. Par exemple, l'utilisation de particules magnétiques fonctionnelles, interagissant de manière très spécifique avec certaines biomolécules, combinée à des approches de type microfluidique, permet de réaliser un tri magnétique de cellules. Dans tous les cas, le contrôle de leur état de surface est crucial pour garantir leur stabilité *in vivo* et permettre une interaction spécifique entre la sonde et sa cible. Le devenir de ces objets nanométriques et des composés issus de leur dégradation dans l'organisme reste le sujet de nombreux travaux, notamment pour évaluer leur toxicité. Dans ces objets la proportion entre nombre d'atomes exposés en surface et nombre total d'atomes augmente quand leur taille diminue. Cette propriété confère une réactivité forte aux nanomatériaux.

Les nanotechnologies ont également largement participé à l'essor de la nano-médecine qui exploite des nano-assemblages pour imager des processus biologiques ou physiopathologiques et/ou pour transporter un médicament (siRNA, molécules anticancéreuses...) du site d'administration au site cible. Cette approche vise : 1/ l'augmentation de la sensibilité des méthodes d'imagerie (agent de contraste), 2/ l'accès à une information de nature métabolique ou moléculaire (marquage), 3/ l'amélioration de la biodistribution

du principe actif en favorisant son accumulation sur le site cible au détriment du reste de l'organisme (contrôle de la délivrance du principe actif). Ceci a pour effet de réduire les effets secondaires des traitements appliqués par voie systémique. Pour l'*in vivo*, le challenge est d'arriver à atteindre une cible de façon spécifique, sans que le système immunitaire n'ait phagocyté l'objet. Le contrôle de ses caractéristiques physico-chimiques (taille, nature et polarité de la surface, nature des ligands) permet de limiter fortement la capture par le système immunitaire et d'augmenter ainsi l'efficacité du ciblage.

La co-encapsulation d'une molécule active et d'un agent de contraste d'imagerie permet de suivre *in situ* la distribution des vecteurs dans l'organisme et leur éventuelle accumulation sur le site cible. Ces vecteurs agents d'imagerie sont appelés agents *théranostiques*. Plusieurs modalités d'imagerie peuvent être utilisées pour révéler la distribution des médicaments (IRM, ultrasons, imagerie optique...) au voisinage de la cible thérapeutique et l'effet thérapeutique correspondant. Enfin, certains objets sont conçus pour être activables, c'est-à-dire capables de délivrer leur contenu sous l'action d'un stimulus extérieur.

La communauté des chimistes travaillant à l'interface chimie – imagerie – biologie s'est structurée notamment autour de *France Bio Imaging* et *France Life Imaging*. Si le développement de ces outils chimiques est généralement bien accueilli au sein des sections disciplinaires correspondantes, les études plaçant la question biologique en avant trouvent leur place au sein de la CID 54. De telles études, mêlant chimie, techniques d'imagerie et questionnement biologique, sont par nature fortement interdisciplinaires. Toutefois l'accessibilité pour les biologistes à des composés développés par les chimistes reste une des difficultés de ce type d'approche. Dans un contexte de marché en pleine croissance, on peut également regretter le faible nombre de vecteurs actuellement mis sur le marché. La difficulté vient essentiellement de la procédure longue et coûteuse pour valider une formulation médicamenteuse.

C. Sondes pour l'environnement

Les animaux équipés d'appareils enregistreurs ou transmetteurs agissent à la manière de sondes environnementales car ils réagissent et ajustent leurs paramètres comportementaux et physiologiques en fonction de stimuli provenant de l'environnement. Ils nous renseignent non seulement sur l'état de l'environnement dans lequel il évolue – à des échelles spatiales et temporelles immédiates et donc pertinentes pour comprendre la biologie de l'organisme vivant étudié – mais aussi sur la plasticité de réaction de l'organisme en interaction avec son environnement. Cette approche, retrouvée dans la littérature sous les dénominations de biotéléométrie (transmission d'information) et bio-logging (enregistrement d'information *in situ*), est interdisciplinaire par essence car elle concerne la biomédecine, la physiologie, l'écologie comportementale, l'écophysiologie, mais aussi les sciences de l'univers tels que l'océanographie, la météorologie, et la géographie. Au niveau français, les laboratoires qui s'intéressent à ce type d'approche sont également à la pointe du développement dans un domaine connexe d'instrumentation en écologie : l'identification automatisée des organismes en conditions naturelles. Cette approche repose sur l'implantation de puces RFID (Radio-Frequency Identification) porteuses d'un numéro d'identification unique. Le numéro d'identification de ces puces sera ensuite lu à distance par des antennes portables ou fixes qui permettront ainsi de reconstruire une partie des allées et venues des organismes marqués et de les relier aux variations des caractéristiques biotiques et abiotiques de l'environnement. Si le suivi RFID présente un découplage spatio-temporel entre l'identification de l'organisme et les conditions environnementales par rapport aux approches de type biotéléométrie et biologging, il permet toutefois de réaliser des suivis d'un grand nombre d'individus, s'approchant presque du niveau des populations.

Enfin, il convient d'intégrer à ce chapitre les sondes écologiques qui prennent la forme de

molécules chimiques émises par les organismes dans leur environnement. Ces molécules, souvent appelées « métabolites secondaires » sont impliquées dans les interactions entre les organismes et leur environnement car elles représentent les vecteurs principaux dans les processus de communication chimique et sont également impliquées dans la réponse des organismes aux changements environnementaux. Les métabolites secondaires contribuent donc significativement à la structuration de la biodiversité et au fonctionnement des écosystèmes. Dans ce cadre, la métabolomique possède de nombreuses applications en écophysiologie, en écotoxicologie et en écologie chimique pour identifier des composés bioactifs impliqués dans les interactions écologiques. Dans le paysage scientifique français, les plateformes et plateaux techniques de métabolomique couvrent ainsi un champ d'investigation large mais qui est naturellement dominé par les applications médicales, toxicologiques, agroalimentaires et agronomiques. Toutefois, et au vu de l'important essor que connaît la métabolomique environnementale, il apparaît capital de développer ce type de plateaux techniques au sein de laboratoires d'écologie.

V. Systèmes bioniques, biomimétiques et bioinspirés

La bionique et la biomimétique concernaient à l'origine la conception de systèmes artificiels reproduisant des caractéristiques propres aux systèmes biologiques tels que les biomatériaux, les processus de synthèse, la détection sensorielle, le traitement de l'information, les comportements animaux, ceux des écosystèmes. Si cette définition est toujours valable pour la biomimétique, la bionique se situe maintenant à l'interface entre des systèmes artificiels (implants, électrodes...) et les tissus biologiques excitables pour le pilotage, par

exemple, de prothèses robotisées ou d'exosquelettes. Ces approches ont un double objectif : une meilleure compréhension du vivant et le développement de nouvelles technologies, souvent non-intuitives, issues de données ou de modèles obtenus à partir d'expériences menées en biologie. Ces approches biomimétiques se déclinent de l'échelle de la molécule unique à celle de l'organisme entier. Quelques exemples en sont donnés ci-dessous.

A. Échelle moléculaire

À l'échelle subcellulaire, les pores nucléaires constituent l'unique porte d'entrée et de sortie du noyau des cellules. Ils forment un passage sélectif aux acides nucléiques et aux protéines échangées entre le noyau et le cytoplasme. Grâce aux interactions avec des protéines spécifiques, ils sont responsables du contrôle qualité des ARN messagers exportés et donc des protéines produites. Des nanopores biomimétiques ont été développés et associés à des membranes afin d'étudier la dynamique de leur fonctionnement. La compréhension du fonctionnement de ces pores modélisés permettra d'aborder l'étude de leurs rôles et ainsi de mieux caractériser l'étiologie des pathologies associées à une mauvaise élimination d'ARN messagers non conformes. Une autre voie est la préparation de récepteurs couplés à des canaux ioniques pour la détection et la quantification ultrarapide d'une large variété de composés. À la frontière entre l'échelle moléculaire et les biomatériaux, la compréhension et la capacité à reproduire et contrôler des processus comme la biominéralisation produiront des pistes novatrices dans notre capacité à comprendre et résoudre les problèmes de santé liés à la dégradation des tissus osseux.

B. Échelle cellulaire

La cellule vivante est un système complexe qu'un grand nombre d'équipes cherchent à

comprendre grâce à des approches biomimétiques. Un liposome artificiel contenant actine et composants cytosoliques minimaux forme un système reconstitué qui permet de mimer le cytosquelette. L'addition de moteurs moléculaires permet de reproduire le mouvement cellulaire et d'étudier, en conditions contrôlées, les mécanismes physiques et biochimiques qui le gouvernent. Ces connaissances serviront à terme pour actionner des robots micrométriques. La bioingénierie est un domaine également fondé sur la biomimétique. L'ingénierie tissulaire, par exemple, représente une alternative à la transplantation pour le remplacement de tissus endommagés. Elle implique l'association de biomatériaux susceptibles d'assurer les fonctions mécaniques du tissu artificiel avec des cellules capables d'en assurer les fonctions biologiques spécifiques. Ceci suppose la connaissance des mécanismes d'interaction des cellules avec leur environnement extracellulaire et leur reproduction au sein du tissu artificiel. De nombreux travaux s'attachent par exemple au contrôle des propriétés chimiques, topographiques et mécaniques des biomatériaux afin de favoriser leur interaction avec les cellules et même de les stimuler.

C. Biomimétisme neuronal et tissulaire

Au niveau neuronal, des puces électroniques dites neuromorphiques reproduisent sous forme de circuits micro-électroniques des traitements du signal dits neuronaux. Par exemple, une meilleure compréhension de la vision des vertébrés et des invertébrés a permis le développement de technologies neuromorphiques remarquables telles que des caméras rapides inspirées de la rétine de l'homme ou encore des capteurs optiques reproduisant fidèlement la vision panoramique de l'insecte pour des applications robotiques. Les sonars naturels rencontrés chez les mammifères (chiroptères, cétacés) sont aussi une source d'inspiration intéressante pour l'ingénierie acoustique.

D. Comportement/Locomotion

À l'échelle du comportement, la locomotion, qu'elle soit aquatique, terrestre ou aérienne, a donné lieu à de nombreuses études de modélisation associées souvent à des réalisations robotiques remarquables telles que des robots poissons, des robots humanoïdes et des robots reproduisant un vol battu. Mais le mouvement ne peut se dissocier de la perception, qui a donné lieu à de nombreux modèles mathématiques issus notamment de travaux de neuroéthologie tels que l'étude de la navigation chez l'abeille ou encore de la stabilisation de la tête chez la guêpe. La modélisation du sens du toucher chez l'homme, de l'audition chez la chauve-souris, de l'olfaction chez le papillon de nuit mais aussi du sens électrique chez le poisson sont autant d'exemples se situant à l'interface entre sciences du vivant et sciences de l'ingénieur.

E. Écosystèmes

Les écotrons s'attachent à recréer un écosystème dans sa complexité. La possibilité de travailler en conditions contrôlées à l'échelle d'un écosystème offre de nombreux avantages dont celui de pouvoir faire varier un ou plusieurs paramètres physiques et/ou chimiques et de suivre les répercussions de ces changements sur les paramètres abiotiques et biotiques de l'écosystème étudié. Le développement et l'utilisation de ces systèmes sont à la pointe de l'instrumentation et jouent un rôle majeur dans l'évaluation des risques de modifications des écosystèmes naturels en réponse à des modifications anthropiques (pollution, organismes génétiquement modifiés, perturbations physiques de l'habitat, etc.) et/ou liées aux modifications attendues des conditions environnementales dans un contexte de changements climatiques globaux (réchauffement, sécheresse, augmentation des rayonnements ultra-violets, etc.).

Conclusion

La diversité des approches exposées dans ce document constitue une réelle opportunité de progrès dans de nombreux domaines. Toutefois l'interdisciplinarité est associée à des difficultés spécifiques, ce qui suscite deux commentaires déjà présents dans le rapport de conjoncture précédent. Le premier concerne le parcours professionnel des chercheurs. L'ouverture interdisciplinaire nécessite un cheminement long et un investissement important, ce qui peut conduire à des recrutements tardifs. La spécificité des projets de recherche et des parcours, à la frontière des disciplines, nécessite donc une évaluation spécifique afin de ne pas fragiliser les individus et les stratégies de recherche. Le second commentaire concerne le financement de la recherche. Les activités réellement en rupture, donc en dehors des stratégies bien établies, peinent parfois à être financées. Bien que parfaitement identifiée et de plus en plus mise en exergue, l'interdisciplinarité est plus difficilement reconnue quand il s'agit de dégager et de mettre en œuvre les moyens requis.

L'interdisciplinarité, moteur de recherche et d'innovation, doit donc être appréhendée dans sa complexité et doit être protégée. La question de la pérennisation de la CID 54 se pose. Au-delà de la cohérence stratégique que cela représenterait, cette pérennisation garantirait une solution sereine pour le recrutement et l'évaluation des chercheurs. Dans le cadre de cette pérennisation, une ouverture de la CID 54 pourrait être effectuée en direction de la bioinspiration, dans une acception bien plus large que celle décrite dans le paragraphe précédent. Il ne s'agirait plus seulement de considérer des systèmes bioinspirés destinés à comprendre ou manipuler des systèmes biologiques, mais de favoriser la conception de nouveaux procédés et objets directement inspirés de la biologie. Cette approche a déjà contribué à des développements aussi variés que l'intelligence artificielle, les matériaux composites, la robotique, la chimie verte, les nanotechnolo-

gies, avec des applications dans des domaines aussi variés que l'informatique, le bâtiment, l'aéronautique et la marine. Cette approche innovante pourrait permettre de répondre aux nouveaux défis sociétaux que sont la production et la gestion d'énergie, la sobriété et la

durabilité, favorisant ainsi une transition vers une société plus respectueuse de la nature. Ces recherches interdisciplinaires mériteraient aujourd'hui de disposer d'un socle conceptuel clairement identifié au sein de la recherche publique.

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

AI : Assistant(e) ingénieur(e)	DR : Directeur(trice) de recherche
ANR : Agence nationale de la recherche	DRH : Direction des ressources humaines
BAP : Branche d'activité professionnelle	DU : Directeur(trice) d'unité
CID : Commission interdisciplinaire	EA : Équipe d'accueil
CN : Comité national	ED : École doctorale
CNRS : Centre national de la recherche scientifique	ENS : École normale supérieure
CNU : Conseil national des universités	EPCSCP : Établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel
CONRS : Comité national de la recherche scientifique	EPIC : Établissement public à caractère industriel et commercial
COMUE : Communauté d'universités et établissements	EPST : Établissement public à caractère scientifique et technologique
CPER : Contrat de programme État-Région	EQUIPEX : Équipement d'excellence
CSI : Conseil scientifique d'institut	ERC : <i>European Research Council</i>
CR : Chargé(e) de recherche	ESR : Enseignement supérieur et recherche
CRAC : Compte rendu annuel d'activité des chercheurs	FEDER : Fonds européen de développement régional
CS : Conseil scientifique	FR : Fédération de recherche
DAA : Directeur(trice) adjoint(e) administratif(ve)	FRE : Formation de recherche en évolution
DAS : Directeur(trice) adjoint(e) scientifique	GDR : Groupement de recherche
DR : Délégation régionale	HCERES : Haut conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur
DR : Délégué(e) régional(e)	HDR : Habilitation à diriger des recherches

IDEX : Initiative d'excellence	ITA : Ingénieur(e)s, technicien(ne)s, et personnels administratifs
IE : Ingénieur(e) d'études	LABEX : Laboratoire d'excellence
IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules	LPPR : Loi de programmation pluriannuelle de la recherche
INC : Institut de chimie	LRU : (Loi relative aux) libertés et responsabilités des universités
INEE : Institut écologie et environnement	MC / MCF : Maître de conférences
INP : Institut de physique	MESRI : Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et l'innovation
INPI : Institut national de la propriété industrielle	PIA : Programme d'investissement d'avenir
INS2I : Institut des sciences de l'information et de leurs interactions	PPR : Programmes prioritaires de recherche
INSB : Institut des sciences biologiques	R&D : Recherche et développement
INSHS : Institut des sciences humaines et sociales	RIBAC : Recueil d'informations pour un observatoire des activités de recherche
INSIS : Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes	RGPD : Règlement général de protection des données
INSMI : Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions	SATT : Société d'accélération du transfert de technologies
INSU : Institut national des sciences de l'Univers	SGCN : Secrétariat général du Comité national
IR : Ingénieur(e) de recherche	SHS : Sciences humaines et sociales
IRL : <i>International Research Laboratories</i> / Laboratoire de recherche à l'international	UMR : Unité mixte de recherche
IT : Ingénieur(e)s et technicien(ne)s	UPR : Unité propre de recherche
	UPS : Unité propre de service

INDEX DES MEMBRES DES SECTIONS ET COMMISSIONS INTERDISCIPLINAIRES

A

ABBADIE Luc, 893
ABOULKER Pierre, 111
ABRUSAN Marta, 675
ABRY Patrice, 129
ADALIAN Pascal, 613
ADAM Jean-Luc, 303
ADAMOU Evangelia, 675
ADELL Nicolas, 777
AFFATICATI Pierre, 485
AFONSO Carlos, 247
AKAMATSU Silvère, 303
ALBIGES-RIZO Corinne, 433
ALLAIRE Grégoire, 847
ALLAL Amin, 823
ALLOIN Fannie, 285
ALPY Fabien, 433
ALVES-GUERRA Maria-Clotilde, 469
AMBLARD Pierre-Olivier, 129
AMIAUD Lionel, 71
AMRA Claude, 149
ANDRAULT Denis, 363
ANDREFF Nicolas, 129
ANGONIN Marie-Christine, 349
ANSARI Réza, 5

ANSELME Brice, 799
ANTEZZA Mauro, 49
ARGENTI Anne-Marie, 675
ARIEL DE VIDAS Anath, 777
ARLAT Matthieu, 447
ARMSPACH Dominique, 285
ARNOULD Pierre-Yves, 363
ARRIGHI Pablo, 111
ARRONDEL Luc, 763
ASSAIANTE Christine, 501
AUBERT Anne-Marie, 847
AUDIBERT Agnès, 433

B

BABONNEAU Florence, 303
BACALEXI Constantina, 697, 911
BACMANN Aurore, 349
BACROIX Brigitte, 171
BAGNÈRES-URBANY Anne-Geneviève, 567
BAILLAT Gilbert, 485
BALAN Lavinia, 927
BALLOU Rafik, 49
BALTER Vincent, 363, 927
BARONE Pascal, 501

BARRAL Philippe, 635
BARRAU Aurélien, 27
BARRE Pierre, 585
BARTHE Yannick, 911
BATTAGLIA Jean-Luc, 187
BAUDELET François, 95
BAUDOUIN Lucie, 129
BAUR Jonathan, 847
BEAUVINEAU Claire, 321
BÉGEOT Carole, 613
BELLAHSEN, Nicolas, 363
BELLIER Irène, 777
BELLIER Isabelle, 847
BELS Vincent, 567, 893
BENZAOUZ Abdelhamid, 485
BENECH, Philippe, 149
BENMERAH Alexandre, 433
BENTOZA Patricia, 585
BERBEZIER Isabelle, 49
BERGERET Bernadette, 71
BERGOUNIOUX Gabriel, 675
BERJEAUD Jean-Marc, 397
BERNARD Jean-Claude, 71
BERNARD Monique, 545
BERNARDO Élisabeth, 525
BÉROUD Sophie, 823
BERTHET Gwénaél, 379
BESLAND, Marie-Paule, 149
BESSADA Catherine, 303
BEZIN Laurent, 485
BICKEL Thomas, 95
BIDERE Nicolas, 525
BIENNIER Ludovic, 71
BIGEY Pascal, 545
BIHANNIC Isabelle, 585
BILLARD Cyrille, 613
BILLAUD Marc, 469
BIRON David, 893
BISCANS Béatrice, 187
BISCHEROUR Julien, 419
BISCHOF Oliver, 469
BLADER Patrick, 433
BLANC Nathalie, 799
BLANC Philippe, 777
BLANK Ulrich, 525
BLAZY Sandrine, 111
BLÉRIOT Yves, 321
BLIN Amandine, 567
BOBTCHEFF Catherine, 763
BOCQUET Marie-Laure, 267
BODIO Ewen, 321
BOGNON Sabinie, 799
BOISSEVAIN Katia, 777
BOISSON Christophe, 213
BOIVIN Michel, 777
BONAFOS Caroline, 95
BONATTI Christian, 847
BONAZZI Mattéo, 525
BONENFANT Christophe, 567
BONNET Célia, 321
BOPP Laurent, 379
BORBON Agnès, 379
BOREE Jacques, 187
BORG Jean-Paul, 469
BORGHI Rachele, 799
BORNETTE Gudrun, 585
BORST Grégoire, 501
BOTANCH Catherine, 545
BOUDIN Frederick, 363
BOUHAÏK Marie, 635
BOULMEDAIS-TOUNSI Fouzia, 213
BOUNIOU Dominique, 379
BOUQUET Cédric, 501
BOUR Olivier, 585
BOURC'HIS Déborah, 419
BOURDEL Thomas, 71
BOURGEOIS Christine, 525
BOURINET Emmanuel, 485
BOURRION Olivier, 5
BOUSQUET-ANTONELLI Cécile, 447
BOUSQUET-MÉLOU Mireille, 847
BOUSSARD Valérie, 745
BOUTTE Yohann, 447
BOUVERET Emmanuelle, 419
BOUVIER Caroline, 247
BOYEN Catherine, 447
BRAGA José, 613
BRANCHER Pierre, 187
BRAUD Agnès, 111
BRAU NOGUÉ Sylvie, 349
BRENNER Catherine, 469
BRESCH Didier, 847
BRIOT Sébastien, 129
BRISCHOUX François, 567
BROUET Véronique, 49
BROUILLET Emmanuel, 545

BRU-CHEVALLIER, Catherine, 149
 BRUNEL Marc, 71
 BRUNETON Yannick, 655
 BRUNORI Luisa, 745
 BRUXELLES Laurent, 613
 BURDIN Sébastien, 49
 BURÉ Corinne, 321
 BUSSY Agnès, 267

C

CAFFAREL Michel, 267
 CAILLON Sophie, 893
 CALISTI Annette, 71
 CALVO Florent, 71, 863
 CAMBRÉSY Laurent, 349
 CAMPO Nathalie, 419
 CAMY Patrice, 71, 927
 CANAFF Christine, 285
 CANTEREAU Anne, 469
 CANTÙ TESTA Paola, 697
 CARDIN Philippe, 363
 CARLES Christel, 447
 CARPITELLI Elisabetta, 675
 CARRASCO Nathalie, 349
 CARRE Patrick, 187
 CARTIGNY Pierre, 363
 CASALIS Séverine, 501
 CASANE Didier, 433
 CASSIN Matthieu, 635, 863
 CASTELAIN Cathy, 863
 CECCHETTO Carlo, 675
 CHABAUD Laurent, 247
 CHABERT Marie, 129
 CHACON-CARILLO Cyril, 49
 CHAINE Raphaëlle, 129
 CHAMI Malik, 379
 CHAMPAGNE-LAVAU Maud, 675
 CHAMPY Florent, 911
 CHAPOTON Frédéric, 847
 CHAPPARD Christine, 545
 CHARLES François, 847
 CHARLEUX Isabelle, 777
 CHARPENTIER Marie, 567, 893
 CHARRU François, 187
 CHARTIER Thierry, 303
 CHASSEROT Sylvette, 485
 CHAUVET Sophie, 433
 CHAVANE Frédéric, 501
 CHAVRIER Philippe, 433
 CHAZEAU Laurent, 213
 CHEBLI Karim, 419
 CHESSEL Marie-Emmanuelle, 655
 CHEVALOT Isabelle, 187
 CHEVOLOT Yann, 285
 CHIAPELLO Isabelle, 379
 CHIAVASSA Andrea, 349
 CHILLÀ Francesca, 27
 CHOSSENOT Raphaëlle, 635
 CLAIRAMBAULT Pierre, 111
 CLAUDIN PHILIPPE, 95
 CLAVIER Nicolas, 267
 CLEYNEN Alice, 875
 CLOFENT-SANCHEZ Gisèle, 545
 COCCO Simona, 95
 COEFFARD Vincent, 247
 COHEN-TANNOUDJI Joëlle, 469
 COLL Jean-Luc, 927
 COLLAS Nicole, 379, 863
 COLLIN Thibault, 485
 COLLOCH Nathalie, 397
 COLLOMB Jean-Luc, 469
 COMON Hubert, 111
 COMPATANGELO-SOUSSIGNAN Rita, 635
 CONDAT Laurent, 129
 CORMINBOEUF Bernard, 745
 CORNELIUS Thomas Walter, 95
 CORONAS Valérie, 469
 CORREGE Thierry, 379
 CORTIJO Elsa, 863
 COSSART Etienne, 613, 893
 COSTAMAGNO Sandrine, 613
 COTTEREAU Régis, 171
 COULET Marie-Vanessa, 303
 COURSOUL Sylvie, 447
 COURTOIS Gilles, 847
 COUSIN Fabrice, 213
 COUTARD Olivier, 799
 CRASSOUS Jeanne, 247
 CRENN Chantal, 777
 CRESPIN Renaud, 911
 CROS Vincent, 49
 CUVILLIER Olivier, 469
 CZERNY Boris, 697
 CZIZEK Mirjam, 321

D

DAGENS Béatrice, 149
DAGHIA, Fédérica, 171
DAGIRAL Éric, 745
DAGORNE Samuel, 285
DAKHLI Leyla, 655
DANG Ai-Thu, 763
DARD Olivier, 655
DARMON Rachel, 697
DAVID Jean-Philippe, 567
DAVID Sébastien, 763
DAVOUST Jean, 525
DAWSON Jaime, 5
DAYRE Pascal, 111
DE LUCA Livio, 799
DEANDREA Aldo, 5
DEBARSY Nicolas, 763
DEBAX-VIADER Hélène, 635
DEBOEUF, Stéphanie, 171
DEBONTRIDDER Francois, 95
DEDIEU Stéphane, 545
DELON Julie, 847
DELOULE Étienne, 363, 893
DEMARQUE Michael, 485
DEMAZIÈRE Didier, 823
DEMEULENAERE Élise, 777, 893
DENIAU Elise, 213
DENIS Pascal, 675
DENIZOT Yves, 525
DERAT Marie-Laure, 635
DERNAT Rémy, 111
DESAGHER Solange, 433
DESCROIX Luc, 585
DESFRAŒOIS Charles, 71
DESPRAT Stéphanie, 585
DESWARTE Thomas, 635
DEWITTE Boris, 379
DE ANGELI Alexis, 447
DE LA SALLE Mikael, 847
DE PERSIS Stéphanie, 187
DE WITTE Frédérique, 397
DHAENENS Clarisse, 111
DIANI, Julie, 171
DIDIER Anne, 501
DIDIERJEAN André, 501
DIEBOLT Claude, 763
DIOP, Amadou, 171

DOMARACKA-ROUSSEAU Alicia, 71
DOMINGO Pascale, 187
DONARD Olivier, 267
DONATI Caterina, 675
DONCESCU Nathalie, 545
DONNADIEU-BERNARD Florence, 585
DONTENWILL Monique, 545
DOREAU Hervé, 187
DOREAU, Hervé, 893
DOUADY Christophe, 567
DOUAR Touati, 321
DOUBLET-DAR Patricia, 525
DOUMIC Marie, 875
DREVET Joël, 863
DREYFUS Magali, 745, 893
DRUON, Frédéric, 149
DUBOIS Joëlle, 863
DUBOULOZ Adrien, 847
DUBOULOZ Jérôme, 613
DUCA Maria, 321
DUCHEMIN Xavier, 567, 875
DUCHÈNE Stéphanie, 363
DUCHIEN Laurence, 111
DUCOURET Guylaine, 213
DUFRAISSE Alexa, 613
DUHAMEL Louise, 285
DUHARCOURT Sandra, 419
DUJARDIN Gilles, 247
DULONG DE ROSNAY Mélanie, 911
DUMASY Lise, 863
DUMONS Bruno, 655
DUPERRET Anne, 363
DUPRE Aude-Isabelle, 433
DUPUY Claire, 823
DUQUESNE Katia, 321
DURAND Alain, 213
DUSSOUBS Bernard, 303, 893
DUSSUTOUR Audrey, 501
DUVAL Jerome, 585

E

ÉGRÉ Paul, 697
ELKHALDI Mohamed, 5
EL MIRI Mustapha, 745
EMILIANI Stéphane, 525
EMILIANI Valentina, 927

ENAUX Christophe, 799
 ENNINGA Jost, 525
 ENRIQUEZ Nathanaël, 847
 ENSUQUE Christine, 501
 EPRON Florence, 285
 ERDI Gülçin, 799
 ESPUCHE Eliane, 213
 ETCHART VINCENT Nathalie, 763
 ETCHART-VINCENT Nathalie, 911
 ETTORRE Mauro, 149
 ETXEBERRIA Urtzi, 675

F

FALCK Valérie, 745, 911
 FALQUE Philippe, 303
 FAUCHER Florence, 823
 FAURE Philippe, 485
 FAURE Stéphane, 71
 FAURIE Damien, 95
 FERNANDEZ Anne, 433, 911
 FERRARI Marc, 349
 FERRO Myriam, 875
 FERTIN Guillaume, 875
 FEUERHAHN Pascale, 697
 FILÉE Jonathan, 567, 875
 FISCHER Aurélie, 847
 FLEITH Guillaume, 213
 FLEURY Fabrice, 397
 FOGLENO Maryline, 419
 FOLTETE Jean-Christophe, 799
 FONTE Christophe, 129
 FORMOSO Bernard, 777
 FORT Gersende, 129
 FORTERRE Yoël, 187
 FORTIS Élisabeth, 745
 FOUCAULT Martial, 823
 FOUCHET Thierry, 379
 FOULQUIER Eric, 799
 FOURCHARD Laurent, 823
 FOURNEL-GIGLEUX Sylvie, 397
 FOURNIER Alban, 763
 FRANCIS Emmanuel, 655
 FRANQUET Evelyne, 585
 FRÉCON Olivier, 847
 FRITZ, Claudia, 171
 FROMY Bérangère, 469

FUKS Benjamin, 27
 FURNISS-YACOUBI Susanne, 777, 911

G

GABRIEL Frédéric, 697
 GALLAY Ines, 397
 GALOP Didier, 893
 GAMATIÉ Abdoulaye, 129
 GANGA Kenneth, 349
 GARAUDEE Stéphanie, 49
 GARCIA-PENALOSA Cecilia, 763
 GARCIER Romain, 893
 GARILIO Patrick, 419
 GATTOBIGIO Mario, 71
 GAUDIN Yves, 397
 GAUTIER-STEIN Amandine, 469
 GAVARD Julie, 469
 GAY Michel, 129
 GAYRARD Véronique, 847
 GEANTET Christophe, 285
 GEORGE Nathalie, 501
 GERARDIN Corinne, 303
 GHEERBRANT Amélie, 111
 GHYSELINCK Norbert, 433
 GIBERT Sébastien, 567
 GIEGE Philippe, 447
 GILLES Nathalie, 111, 911
 GINOUVÈS Véronique, 799
 GIORDANO Valentina, 95
 GIRARD Nicolas, 247
 GIRARD Violaine, 745
 GIRAUD Raphaël, 763
 GIUDICE Emmanuel, 397
 GIUDICI-ORTICONI Marie-Thérèse, 397
 GLAUDE Pierre-Alexandre, 187
 GODART-WENDLING Beatrice, 675, 863
 GODOY DIANA Ramiro, 187
 GOEB Sébastien, 247
 GOETZ Jacky, 433
 GOJARD Séverine, 745
 GOLEBIOWSKI Jérôme, 397
 GONTHIER Marie-Christine, 349, 911
 GORDIN Doïna-Margareta, 303
 GOURDON Vincent, 655
 GOUTAS Nejma, 613
 GRANET-ABISSET Anne-Marie, 655

GRANIER DE CASSAGNAC Raphaël, 5
GRATUZE Bernard, 635
GRAUBY-HEYWANG Christine, 71
GRAVOUIL, Anthony, 171
GREMILLET David, 927
GREY Corinne, 419
GRIMALDI Stéphane, 397
GRIMAUD Laurence, 247
GUADAGNOLI Diego, 27
GUELLATI-KHELIFA Saida, 71
GUERARD, Sandra, 171
GUERMEUR Ivan, 635, 863
GUESMI Hazar, 285
GUICHARD Gilles, 321
GUIGNARD Marie, 303
GUILBERT-LEPOUTRE Aurélie, 349
GUILHOT Jean Oliver, 635
GUILLEMOLES Jean-François, 285
GUILLOCHEAU François, 363
GUINAUDEAU Isabelle, 823
GULA Jonathan, 379
GULON Tioga, 267

H

HADDAD Élie, 655
HAGHIRI Anne-Marie, 927
HAIDOUX Abel, 303
HALBERSTADT Nadine, 71
HAMMANI Kamel, 447
HAPIOT Philippe, 267
HARRISSON Simon, 213
HASSOUNI Khaled, 187
HATHOUT Nabil, 675
HATTENSCHWILER Stephan, 585
HEBRAUD Pascal, 213
HEID Caroline, 635
HELPER-COZIC Emmanuèle, 213
HELLWIG Petra, 267
HEMERY Malika, 469
HENRI Pierre, 349
HENRIET Fanny, 763
HENRY Isabelle, 863
HÉRAUD Nicolas, 129
HERAULT Laurence, 777
HERZOG Étienne, 485
HEURTIN Jean-Philippe, 823

HEUX Laurent, 213
HEYBERGER Laurent, 655
HIERSO Jean-Cyrille, 285
HOCHMANN Jean-Remy, 675
HODGES Michael, 447
HOFFMANN Philippe, 697
HOLDSWORTH Peter, 27
HUBER Aline, 419
HUDRISIER Denis, 525
HULLARD Emmanuelle, 469
HUMBERT Véronique, 613
HURET Romain, 655
HURLET Frédéric, 635
HUYGHE Annie, 379

I

ILLOUZ Charles, 777
IMBERT Isabelle, 397
IMMEL Françoise, 447
INGRAM Gwyneth, 447
INNOCENT Christophe, 911
IVANOVICI Danela Oana, 847

J

JABER Maguy, 911
JACQUES Vincent, 49
JAMI Catherine, 655, 911
JARNOUX Philippe, 655
JAULT Jean-Michel, 397
JEANNEAU Laurent, 585
JEBBAR Mohamed, 567
JOMELLI Vincent, 613, 863
JOUAITI Abdellaziz, 285
JOUBERT Claire, 697
JOUBERT Olivier, 303
JOUZEAU Jean-Yves, 545
JUHÉ-BEAULATON Dominique, 655
JUIN Philippe, 469, 875
JURADO APPRUZZESE Beatriz, 5

K

KABBOUR Houria, 303
KACHENOURA Nadja, 545

KACZMAREK Gilles, 349
 KAHN Myrtil, 285
 KALUSZYNSKI Martine, 745
 KEICHINGER Corinne, 447
 KERFELEC Brigitte, 545
 KHAN Élias, 5
 KHODRI Myriam, 379
 KLARIC Laurent, 613
 KLEIN Lorena, 863
 KLEIN Olivier, 49
 KLEIN Philippe, 613, 863
 KOCIAK Mathieu, 95
 KODJABACHIAN Laurent, 433
 KOSZUL Romain, 419, 875
 KOTERA Kumiko, 349
 KRAZUCKI, Françoise, 171
 KUHN Alexander, 267

L

L'HARIDON Oliver, 763
 LABADIE Pierre, 585
 LABOISSIERE Rafael, 501, 875
 LABOURÉ, Eric, 149
 LACAMPAGNE Alain, 469
 LACROIX Jean-Christophe, 267
 LADOUX Benoît, 433
 LAFONTAINE Ingrid, 419
 LAJEUNESSE Eric, 585
 LAKHDAR Sami, 247
 LAMBERTS Christine, 799
 LAMONIER Jean-François, 285
 LAMOTTE Agnès, 613
 LAMY Thierry, 5
 LANCELIN Denis, 501
 LANDE Aurélien de la, 267
 LANGLAIS Mathieu, 613
 LAPLAZE Laurent, 447
 LARRE Jean-Marc, 111
 LASSAQUE Didier, 927
 LASSAQUE, Didier, 171
 LAUNAY Jean-Jacques, 525
 LAURENT Adèle, 267
 LAURENT Benoit, 379
 LAURENT Guillaume, 267
 LAVENIER Dominique, 111, 875
 LAVERMAN Annet, 585
 LE ROUZO Judikaël, 149
 LEBLANC Catherine, 893
 LEBON Frédéric, 863
 LEBRETON Jacques, 247
 LECLERC Catherine, 433, 863
 LECLERC Olivier, 745, 911
 LECOMTE Sophie, 267, 927
 LECOMTE Vivien, 27
 LECONTE Ludovic, 927
 LEDUC CÉCILE, 95
 LEFEVRE Corinne, 655
 LEFLOCH Bertrand, 349
 LEGRAND Bernard, 149
 LEGROS Daniela, 213
 LEJEUNE, Arnaud, 171
 LELOUARD Hugues, 525
 LEMAITRE Aristide, 49
 LEMERDY Christian, 847
 LEMOINE-LARDENNOIS Christelle, 501
 LEMPÉRIÈRE Annick, 655
 LÉONARD Julien, 655
 LEPETIT Marie-Bernadette, 49
 LERAT Emmanuelle, 419
 LERAT Marie, 777
 LEREU, Aude, 149
 LESAGE Florian, 545, 927
 LESNARD Laurent, 745
 LESOURD Céline, 777
 LESUEUR Denis, 129
 LETHIEN, Christophe, 149
 LEVANT Yves, 763
 LEVELUT Claire, 95
 LE BIHAN Anne-Catherine, 5
 LE BORGNE Chantal, 187
 LE CROM Jean-Pierre, 745
 LE GRATIET Luc, 49
 LE MOINE Catherine, 485
 LE PIERRES Nolwenn, 187
 LE POULENNEC Claire, 823
 LE QUERE Patrick, 187
 LIBERTI Leo, 111
 LIECHTENHAN Francine-Dominique, 655
 LINGUEGLIA Éric, 485
 LISZKAY Anja, 447
 LÖFBERG Axel, 863
 LOISEAU Frédérique, 267
 LOMPRÉ Nicole, 799
 LONG Nathalie, 799

LORCY Dominique, 285
LOTT François, 379
LOUBIERE Karine, 187
LUCA Nathalie, 777
LUMINEAU Sophie, 501
LUTJENS Hinrich, 71
LUXARDO Giancarlo, 675

M

MABROUK Kamel, 247
MACIA Enguerran, 893
MADRANGEAS, Valérie, 149
MAGAND Olivier, 379
MAGGS Anthony, 213
MAGLIONE Mario, 303
MAGNAUDET Jacques, 187
MAGNIER Emmanuel, 247
MAGUER-SATTA Véronique, 469
MAIA Marcia, 363
MAIGNAN Antoine, 303
MAIRE, Éric, 171
MALARTRE Marianne, 433
MALBERT, Nathalie, 149
MALLIAVIN Thérèse, 875
MALVAL Jean-Pierre, 267
MANDAIRON Nathalie, 485
MANET Évelyne, 525
MARCELLESI Marie-Christine, 635
MARCHAND Gregor, 613
MARÉCHAL Éric, 447
MARI Giuseppina, 419
MARIE Nicolas, 545
MARIE-BEGUE Emmanuelle, 927
MARION Frédérique, 5
MARQUET Roland, 397
MARQUETTE Arnaud, 267
MARQUIS Pierre, 911
MARTEL Caroline, 363
MARTIN Antoine, 447
MARTIN Jean-Claude, 129
MARTIN Pascal, 213
MARTIN Véronique, 863
MASSINES Françoise, 187, 863
MASSOBRIO Carlo, 303
MASSON Sophie, 349, 799
MASSOTTE Dominique, 545, 863

MATEA Iolanda, 5
MATHIEU Véronique, 613
MATHIS Chantal, 501
MAUREL François, 267
MAURICE Jonathan, 763
MAURICE Tanguy, 545
MBEMBA-LOUMPANGOU Gladys, 397
MÉLÈS Baptiste, 697
MELIN Thierry, 49
MERLE Elsa, 5
MERLIN Vincent, 763
METAY Estelle, 247
MICLET Emeric, 321
MICOUIN Laurent, 321
MIELE Philippe, 303
MIKANOVIC Aleksandra, 823
MILLÉRIOUX Gilles, 129
MILLET, Olivier, 171
MIQUEU Karinne, 247
MONARI Antonio, 267, 875
MONCEL, Jean-Luc, 149
MONOD Anne, 379
MONTEIL Arnaud, 469
MONTEL Laurence, 655
MONTES Hélène, 213
MORDANT Nicolas, 187
MORIN Guillaume, 585
MORLON Hélène, 567
MORTESSAGNE Fabrice, 95
MOSSER Benoît, 349
MOTTET Christine, 49
MOUILLOT Florent, 585
MOULTAKA Jihane, 349
MULLER Pierre, 95

N

NAMY Olivier, 419
NARDIN Élise, 363
NASO Aurore, 187
NAVA Paola, 285
NAVAILLES Laurence, 95
NEBUT Tanguy, 363
NEVEU Erik, 823
NEYRAT Frédéric, 745
NGO Mai-Anh, 763
NIQUIL Nathalie, 585

NIVARD, Mariette, 171
 NONDIER Isabelle, 485, 875
 NOTHIAS Fatiha, 485
 NOUCHER Matthieu, 799
 NOUI Karim, 27
 NOVAK Jérôme, 349
 NUSSAUME Laurent, 447

O

OLADÉ ABOH Enoch, 675
 OLLAGNIER DE CHOUDENS Sandrine, 321
 OTERO Olga, 567
 OUALI Armelle, 247
 OUERFELLI Mohamed, 635
 OURIACHI Marie-Jeanne, 635, 863
 OWEZARSKI Philippe, 111
 OZANAM François, 285

P

PARA Franck, 95, 927
 PARGUEL Béatrice, 763
 PAROL Frédéric, 379
 PASQUALI Paul, 745
 PASTORELLI Sabrina, 777
 PATINET, Sylvain, 171
 PEAUCELLE Dimitri, 129, 863
 PECHEUR Isabelle, 525
 PECQUEUX Anthony, 799
 PELCAT Maxime, 129
 PELLARD Thomas, 675
 PELLO Roser, 349
 PERA Marie-Cécile, 149
 PERDRIX Simon, 111
 PÉREZ Thierry, 567, 927
 PERFETTI Luca, 49
 PERRAIS David, 485
 PERRIO Cécile, 545
 PERRON Muriel, 433
 PETER Patrick, 27
 PETKOVIC Aleksandra, 27
 PETRIC Boris, 777
 PETRINI Michela, 27
 PETROSYAN Artyom, 27
 PEYRIN Françoise, 875

PEYSSONNAUX Carole, 469
 PHILIPPE Anne, 847
 PICARD Franck, 875
 PICHOT-DOULCIER Jocelyne, 745
 PIECHON Frédéric, 49
 PIGNOL Guillaume, 5
 PINS Delphine, 501
 PINTACUDA Guido, 247
 POISSON Lionel, 71
 POPA Daniela, 485
 POPA Ioana, 823
 POQUILLON Dominique, 303
 POTIER Marie-Claude, 485
 POUGET Pierre, 875
 POUVELLE Bruno, 525
 PRADO Soizic, 585
 PREVOTS Evelyne, 95
 PROTEAU Laurence, 745
 PRUVOST Laurence, 71
 PUDAL Romain, 745
 PUIG Nicolas, 777

Q

QUADRELLI Elsje Alessandra, 285
 QUEFFELEC Alain, 893
 QUENNOUËLLE-CORRE Laure, 655
 QUIDEAU Stéphane, 247
 QUIJOUX Maxime, 823

R

RABOUILLE Sophie, 379
 RAGOUCY AUBEZON Éric, 27
 RAHLI Ouamar, 187
 RAMIREZ Philippe, 777
 RASSENDREN François, 485
 RAUX Sophie, 655
 REGUIG Delphine, 697
 REINTGES Christoph, 675
 RENARD Pierre-Yves, 321
 RENAUX-PETEL Sébastien, 27
 REY-FOURNIER Béatrice, 763
 RIAL-SEBBAG Emmanuelle, 745
 RICARDEAU Frédéric, 149
 RICHAUME-JOLION Agnès, 585

RIEU Jean-Paul, 927
RIVASSEAU Vincent, 27
RIVERO Ana, 567
RIVET Alain, 213
RIVIERE Michel, 545
ROBILLARD Tony, 567
ROCH, Isabelle, 149
RODNEY David, 95
RODRIGUEZ Frédéric, 247
ROEST CROLLIUS Hugues, 419
ROGNAN Didier, 321
ROLLAND-HAESE, Nathalie, 149
ROSAT Séverine, 363
ROSSET Sophie, 129
ROSTAIN Stephen, 613
ROUSSEAU Emmanuel, 49
ROUSSEAU François, 129
ROUSSELIN-TIVÉRON Marie-Catherine, 485
ROUTIER Sylvain, 321
ROUX Philippe, 363
ROWELL Jay, 745
ROY Christelle, 863
RUSSO Michela, 863

S

SAC-EPEE Jean-Marc, 847
SACUTO Alain, 49
SAHRAOUI Fouad, 349
SAITTA A. Marco, 95
SALMON Gildas, 697
SALUZZO Christine, 247
SALZENSTEIN, Patrice, 149
SANDERS Lena, 799
SANDOZ Jean-Christophe, 501
SARACCO Ginette, 893
SARTHOU Géraldine, 379
SAULOT, Aurélien, 171
SAUTTER Violaine, 363
SAVARINO Joël, 379
SAYER William, 675
SCHALK Isabelle, 397
SCHILTZ Odile, 321
SCHMIDER François-Xavier, 349
SCHMIDT Frédéric, 321
SCHMIT Anne-Catherine, 447
SCHMITT Véronique, 213

SCHMUTZ Jacob, 697
SCHNEIDER Laurent, 635
SCHOEHN Guy, 397
SCORNAVACCA Celine, 111
SEBBAN Stéphane, 71
SEGARRA MONTANER Marta, 911
SELIMBEGOVIC Leila, 501
SEMAL Catherine, 501
SENÉ Sylvain, 111
SENEILLART Pierre, 111
SENS Pierre, 111
SENTCHEV Alexei, 379
SERBAN Didina, 27
SERRE Solveig, 697, 863
SEYEUX Antoine, 285
SILVIE Olivier, 525
SIME-NGANDO Téléspore, 585, 893
SIMOENS Serge, 927
SIMOES Martine, 363
SIMON Marc, 267
SIRIGU Angela, 501
SKIPETROV Sergei, 95
SMITH Andy, 823
SMYRL Marc, 823
SOCK Rudolph, 675
SORLIN Olivier, 5
SPECTOR Benjamin, 675
STAERCK Sébastien, 447
SUREL Yves, 823

T

TACHIKAWA Kazuyo, 379
TAGLIONI François, 799
TAILLANDIER Patrick, 799
TAKI Abdelmadjid, 71
TANK-STORPER Sébastien, 777
TATON Daniel, 213
TATONI Thierry, 893
TERMENTZIDIS Konstantinos, 187, 893
TERRACOL Antoine, 763
TERRAS Véronique, 27
TESTE Alexandre, 863
TÉTAUD Emmanuel, 397
THERY-PARISOT Isabelle, 613
THIBAUD Jean-Paul, 799
THOMASSIGNY Christine, 247

TIFRIT Ali, 675
 TILL-BOTTRAUD Irène, 567
 TISNE-VICROBECK Carine, 397
 TISSERAND Vincent, 5
 TOBIE Gabriel, 363
 TOKARSKI Caroline, 267
 TOMASELLO Élena, 525
 TOMASETTO Catherine Laure, 419
 TOMASINI Richard, 469
 TORRE Dominique, 763
 TOUBOUL David, 321, 911
 TOUGNE Laure, 129
 TOULEMONDE Olivier, 303
 TOURNAT, Vincent, 171
 TOURNAY Virginie, 823
 TOUSSAINT-LEROY Sophie, 27
 TRAÏNI Christophe, 823
 TRAVERT Arnaud, 285
 TRESSET Guillaume, 213
 TREVISIOL Emmanuelle, 545, 927
 TRIC Emmanuel, 363
 TRICARD Simon, 285
 TROMPETTE Pascale, 823
 TROTTEIN François, 525
 TRUAN Gilles, 397
 TRYANTAFYLLIDIS, Nicolas, 171
 TSOUKIAS Alexandros, 863

U

URAS Antonio, 5

V

VACCHIANI-MARCUZZO Céline, 799
 VALLÉE Fabrice, 863
 VALLENET David, 875
 VAN HEIJENOORT Carine, 321
 VANDROMME Marie, 419
 VANRULLEN Rufin, 875
 VANWOLLEGHEM, Mathias, 149
 VASILIU Anca, 697
 VASSEUR, Jérôme, 171
 VAUCHEZ Antoine, 823
 VAURY Chantal, 419

VAUZEILLES Boris, 321
 VAVRE Fabrice, 567
 VEKEMANS Xavier, 567
 VENNAT Elsa, 171
 VERGER Alexis, 397
 VERGNAUD Jean-Christophe, 911
 VERNA Catherine, 635
 VEZIAN Stéphane, 875
 VIANO Cristina, 697
 VIART Nathalie, 49
 VIAUD Benoît, 5
 VIDAL MARTINEZ Edgard, 697
 VILLARD Catherine, 149
 VILLARD Gilles, 111
 VILLEY Émilie, 635
 VINCENDEAU Richard, 823
 VOLAIT Mercedes, 655
 VOLIOTIS Valia, 49

W

WAKKACH, Abdelilah, 525
 WALCZAK Aleksandra, 27, 875
 WALLON Samuel, 27
 WALTER Richard, 697
 WALUKIEWICZ Igor, 111
 WEIL Dominique, 419
 WEILL Mylène, 567
 WEINHARD Laurent, 111
 WENGELNIK Kai, 525
 WERNER Michel, 419
 WINGERTER-SEEZ Isabelle, 5
 WION Anaïs, 655

Y

YON Jean-Baptiste, 635

Z

ZAPOLSKY Héléna, 95
 ZEITOUN Valéry, 613
 ZLOTEA Claudia, 303, 295