

RAPPORT DE PROSPECTIVE DU CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU CNRS

Le 03/12/2018

Michèle Albrecht, Christopher Bauerle, Silke Biermann, Didier Blavette, Mohammed Bouazaoui, Fawzi Boudjema, Fabien Dorchies, Véronique Dupuis, Valentina Emiliani, Rose-Marie Galéra, Jean-Pierre Gaspard, Thérèse Huet, Pascale Launois, Teresa Lopez-Leon, Xavier Marie, Adrien Michon, Frédéric Nguyen Van Dau, Hélène Perrin, Emmanuelle Rio, Pierre-Frédéric Sibeud, Florent Tournus, Sandro Vaienti, Stéphane Vezian, Fatih Zighem.

TABLE DES MATIÈRES

I. Préambule.....	3
II. Introduction	3
III. Interactions fondamentales.....	4
1. Physique des particules, boson de Higgs et problème de la masse	4
2. Matière noire et énergie noire.....	5
3. Quelques développements formels	6
4. Une recherche basée sur des collaborations internationales à long terme.....	7
IV. Lumière et matière.....	7
1. Optique, photonique et plasmonique	7
2. Physique atomique et moléculaire.....	8
3. Matière à haute densité d'énergie	10
Fusion thermonucléaire contrôlée.....	10
Astrophysique et planétologie de laboratoire	11
Nouvelle physique accessible avec les lasers de puissance	11
4. Interface optique-biologie	12
V. Matière condensée et nanosciences.....	13
1. Spintronique et magnétisme.....	14
2. Métallurgie et nanomécanique	16
3. Nanoélectronique quantique et matériaux bidimensionnels	17
4. Energie et matériaux fonctionnels	18
VI. Matière molle et matériaux.....	19
1. Des atomes artificiels aux matériaux du futur.....	20
Métamatériaux	20
Matériaux stimulables	21
2. Nanofluidique et interfaces	21
3. De la biophysique à la matière active	22
VII. Instrumentation aux limites ultimes et TGIR	23
1. Métrologie.....	24
2. Les très grandes infrastructures de recherche	24
Synchrotrons.....	25
Neutrons	25
Champs intenses	26
3. Progrès récents en microscopie électronique et de sonde atomique	27
VIII. Aspects transverses.....	28
1. Vers l'hybridation des domaines de recherche en physique quantique	28
2. Intelligence artificielle	29
3. Phénomènes multiéchelles.....	30
4. Phénomènes hors d'équilibre	31
IX. Physique et société.....	32

I. Préambule

Nous avons principalement consacré la dernière année de notre mandature 2015-2018 à la rédaction du présent rapport. Il ne prétend absolument pas à l'exhaustivité. Il est coloré par nos domaines de compétences, même si nous avons fait appel à de nombreux collègues pour diminuer ce biais. Nous les remercions chaleureusement ici des éclairages différents qu'ils nous ont apportés.

Nous avons écrit ce rapport après que l'Institut de Physique (INP) avait organisé une réflexion prospective, basée sur les apports d'une cinquantaine de chercheurs et enseignants-chercheurs lors d'un séminaire sur plusieurs jours à Cargèse, en novembre 2017. Les nombreux éléments de perspectives qui en sont ressortis sont disponibles sur le site internet de l'INP¹. Dans le présent rapport, qui doit être considéré comme complémentaire à celui du séminaire de Cargèse, nous présentons des réflexions de prospective sur un certain nombre de domaines sans préjuger de leur importance par rapport à d'autres que nous n'avons pas traités. Nous avons essayé de présenter les sujets de manière relativement accessible. Nous espérons que ce rapport pourra être lu par les chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens des laboratoires de l'Institut de Physique, qui travaillent dans des domaines aussi variés que la physique des interactions fondamentales, celle de la lumière, la matière diluée ou condensée, les nanosciences ou la matière molle, ainsi que par nos collègues dans les autres instituts et/ou par toute personne, avec quelques bases en physique, qui s'intéresse à l'actualité scientifique.

Notre conseil a par ailleurs émis des recommandations sur différents sujets sur lesquels il a travaillé, à la demande de la direction de l'INP ou par auto-saisine. Ils sont disponibles sur le site internet du CoNRS et concernent :

- (i) La diffusion des neutrons en France²
- (ii) La valorisation des recherches au CNRS³
- (iii) L'évolution du métier de chercheur dans le contexte des appels à projets⁴
- (iv) La fonction de directeur d'unité⁵

II. Introduction

Les physicien-ne-s ont deux objectifs, celui de comprendre la nature qui les entoure et celui de développer de nouveaux instruments et de nouvelles applications.

Les phénomènes naturels que les physicien-ne-s de l'Institut de Physique du CNRS s'attachent à décrire, à quantifier et à comprendre impliquent des objets à des échelles extrêmement différentes : des particules élémentaires, à partir desquelles les atomes sont construits, aux objets de notre vie quotidienne et jusqu'aux galaxies, en passant par des états de la matière résultant de conditions extrêmes. À toutes ces échelles, l'étude des propriétés de la matière, de son organisation et de ses interactions se révèle cruciale. La compréhension

¹ https://www.cnrs.fr/inp/IMG/pdf/livret_du_2018_pleine_page_web.pdf

² http://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_CSI_INP_Communaute_francaise_des_neutrons_et_reacteur_ORPHEE-101115.pdf

³ http://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_CSI_INP_Valoration301118.pdf

⁴ http://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_CSI_INP_Metier_Chercheur301118.pdf

⁵ http://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/Recommandation_CSI_INP_FonctionDU301118.pdf

de ces propriétés requiert un aller-retour permanent entre expériences et modélisation, la modélisation des phénomènes observés et mesurés menant à des prédictions qui doivent être validées par de nouvelles expériences.

Cette étude des phénomènes naturels nécessite une instrumentation adaptée, avec des développements de haute technicité qui sont ensuite souvent transférés vers d'autres domaines. De plus, au-delà de ces développements, un travail considérable est réalisé pour créer des matériaux artificiels et répondre à des défis sociétaux majeurs, souvent grâce à la compréhension nouvellement acquise de certains phénomènes. Inversement, certaines applications développées pour répondre à des besoins ouvrent la voie à des questions fondamentales.

Cette année 2018 consacre la redéfinition des unités du système international (voir § VII). La notion de mesure est à la base de la démarche des physiciens. Leur démarche inclut aussi le développement d'approches aussi unificatrices que possible. La physique est naturellement tournée vers les autres disciplines et nous illustrerons cette interdisciplinarité au fil de notre rapport.

Nous présentons quelques domaines de recherche développés à l'INP dans les paragraphes III-VI suivant un découpage inspiré de celui des sections du CoNRS (paragraphe III-section 2, paragraphe IV-section 4, paragraphe V-sections 3 et 5, paragraphe VI-sections 5 et 11). Cette catégorisation ne doit pas masquer les interactions entre les différents domaines de recherche à l'INP et les frontières définies ainsi sont, heureusement, floues et perméables. En particulier, quelques aspects transverses au découpage en sections sont présentés dans le paragraphe VII. Enfin, le paragraphe VIII discute brièvement des relations entre physique et société, principalement en termes de vulgarisation de la connaissance.

III. Interactions fondamentales

La physique des particules, la physique des astroparticules et la cosmologie couvrent les échelles les plus petites au cœur de la matière et les échelles les plus grandes aux confins de l'univers. Sonder de telles échelles requiert des accélérateurs de plus en plus énergétiques (le Large Hadron Collider, LHC, du Centre Européen de Recherche Nucléaire à Genève) et des télescopes de plus en plus sensibles (dont Planck, de l'Agence Spatiale Européenne). La thématique repose sur un socle théorique où l'apport des mathématiques est essentiel. La modélisation théorique prend souvent une approche réductionniste qui à partir de quelques lois fondamentales et briques élémentaires explique et prédit un très grand nombre d'observables. Ces lois fondamentales intègrent des principes de conservation, liés aux propriétés de symétrie du monde physique. Par exemple, la conservation de l'énergie découle de l'invariance par translation du temps. La conservation locale de la charge électrique résulte de la symétrie de jauge de l'interaction électromagnétique.

1. Physique des particules, boson de Higgs et problème de la masse

La matière est constituée au niveau élémentaire d'électrons, de neutrinos sans charge électrique et de deux quarks (les quarks u et d, constituants des protons et des neutrons). Ces particules sont toutes des fermions de spin $1/2$. À côté de cette première famille de constituants de la matière ordinaire, deux autres copies identiques ont été découvertes, la seconde incluant le muon et la troisième le plus lourd des quarks, le quark top. Enfin, à chaque particule est associée son antiparticule. Au cours de l'évolution de l'Univers, un déséquilibre s'est produit entre matière et antimatière. Les prérequis pour que cette asymétrie matière-antimatière existe ont été postulés mais nous ne disposons pas actuellement d'un modèle satisfaisant en accord avec la mesure de cette asymétrie.

Les interactions élémentaires sont les interactions électromagnétique, faible et forte, ainsi que la gravité. Les trois premières, décrites par une généralisation de la théorie quantique relativiste de la lumière, sont portées par des bosons vecteurs de spin 1. La quatrième interaction, l'attraction gravitationnelle, échappe à une description quantique cohérente et prédictive malgré des tentatives utilisant la théorie des cordes (basée sur la notion d'objets étendus plutôt que ponctuels) et plus récemment la théorie de la gravitation quantique à boucles (basée sur la notion de granularité de l'espace). Ceci pose problème quant à notre compréhension profonde de la masse et par conséquent de la nature même de l'espace-temps et de ses propriétés, malgré le succès considérable de la théorie de la relativité générale et l'observation remarquable, en 2015, des ondes gravitationnelles.

L'introduction de masses en physique des particules brise la conservation de la charge faible, avec la perte de la symétrie de jauge associée. Le mécanisme de brisure spontanée de la symétrie fait appel à un potentiel pour des bosons scalaires. Le minimum de ce potentiel, le vide, correspond à une valeur moyenne non nulle qui est alors la source des masses de toutes les particules. Dans la théorie électrofaible, trois des bosons scalaires deviennent des modes longitudinaux des bosons vecteurs, médiateurs des forces. Le quatrième boson est le fameux boson de Higgs, découvert en 2012 peu de temps après le démarrage du LHC, un demi-siècle après que le mécanisme a été suggéré. Avec la découverte du Higgs, le Modèle Standard des particules qui regroupe l'interaction électrofaible et l'interaction forte est au complet. Avec une masse du Higgs, mesurée au LHC, de 125 GeV (125 fois la masse du proton), et une masse du quark le plus lourd, le quark top, de 173 GeV, il semblerait que nous vivions dans un système proche d'un état métastable. L'étude des instabilités du potentiel scalaire est une problématique très active, impliquant expérimentateurs (mesures plus précises des masses) et théoriciens. Le boson de Higgs pose enfin un problème conceptuel. Pourquoi sa masse, 125 GeV, est-elle si incroyablement petite par rapport à la masse de Planck, 2.4×10^{18} GeV (l'échelle de masse fondamentale reliée à la constante de Newton et donc la gravité) ? Y a-t-il une symétrie qui protégerait la masse du Higgs ? La supersymétrie fournit une telle solution en associant à chaque particule du modèle standard une particule sœur, dont le spin diffère d'une demi-unité. Une autre possibilité serait de réinterpréter l'échelle de Planck. Ainsi, dans les modèles faisant appel à des dimensions supplémentaires de l'espace-temps, la force de la gravité serait grandement diluée dans un plus grand volume d'espace-temps. L'échelle caractéristique de la gravité serait alors beaucoup plus proche de l'échelle électrofaible. La troisième option serait que le Higgs soit une particule composée. Ces différents modèles motivent la recherche expérimentale des nouvelles particules prédites et l'étude des propriétés du Higgs (couplage à la matière, aux bosons vecteurs, auto-couplage).

2. Matière noire et énergie noire

Les masses de toutes les particules connues ne représentent que quelques pour cent de la masse de l'Univers. Plusieurs indicateurs forts attestent de l'existence d'une autre forme de matière, la matière noire, qui n'émet pas de lumière visible et qui interagit peu avec la matière ordinaire. Des mesures précises montrent que la vitesse de rotation d'astres à la périphérie des galaxies, loin du disque lumineux, ne décroît pas avec leur distance au centre de la galaxie, comme si la masse de la galaxie était dominée par un halo de matière noire qui englobe le disque galactique. Dans le cadre de la relativité générale, la distorsion des images d'une même source lointaine due à la déflexion par un objet massif invisible donne une mesure quantitative de cette masse noire. Par ailleurs, le gaz chaud dans les espaces extragalactiques observé grâce à l'émission de rayons X ne pourrait être gravitationnellement contenu sans l'effet d'une masse conséquente (la matière noire à nouveau). L'étude du fond diffus cosmologique, et l'observation du rayonnement fossile, est peut-être la preuve la plus irréfutable de l'existence de la matière noire. Les analyses sont devenues plus précises grâce aux instruments Cobe (1992), WMAP (2003) et à la mission Planck (2013), contraignant ainsi plusieurs modèles cosmologiques et de nouveaux modèles de physique des particules. La

formation de structures nous renseigne aussi sur les propriétés de la matière noire et sur son interaction avec la matière ordinaire. Les simulations à N-corps, de plus en plus performantes, permettent de suivre l'évolution d'agrégats de matière noire au cours de l'expansion de l'univers jusqu'à la formation de halos et du puits de potentiel associé où la matière ordinaire pourra germer. Par ailleurs, on pouvait espérer une preuve de l'existence de la matière noire dans les expériences, dites de détections directes, de collisions de la matière noire autour de la Terre avec les noyaux dont on mesurerait l'énergie de recul. Malgré des progrès considérables dans la sensibilité des détecteurs souterrains, aucun signal non ambigu n'a été observé ou corroboré. Mais, pour des particules de matière noire de l'ordre du MeV, ou encore moins massives, la détection directe passerait par les interactions avec les électrons plutôt que les noyaux. Elle ferait appel à de nouvelles techniques basées sur la rupture des liaisons chimiques. La matière noire pourrait aussi être détectée via son annihilation (rare) en positrons et antiprotons, en neutrinos ou en photons mais ces événements n'ont pas été mesurés pour le moment. Enfin, la matière noire pourrait se matérialiser dans les collisions du LHC par l'observation d'énergie manquante. Pour conclure, soulignons que les propriétés de la matière noire sont encore peu connues et font l'objet de nombreuses études théoriques. Les masses des particules et autres objets candidats de matière noire s'étendent de 10^{-22} eV à 10^{70} eV et les sections efficaces d'interaction couvrent plus de 40 ordres de grandeur.

Même la matière noire ne rend pas compte de tout le bilan énergétique de l'Univers. L'énergie noire, déduite de l'accélération de l'Univers, est la composante la plus importante du bilan énergétique du cosmos : elle en représente presque les trois quarts. Cette énergie mystérieuse s'apparente à une gravité répulsive. On ne sait pas si elle correspond à la constante cosmologique de la théorie de la gravitation d'Einstein ou si elle pourrait être incorporée dans des modèles de gravité étendus. De nouveaux télescopes (le Large Synoptic Survey Telescope au Chili, Euclid, etc.) pourront apporter des informations précieuses sur cette énergie noire. Pour étudier cette énergie noire, des études associant des signaux d'ondes gravitationnelles à des événements électromagnétiques tels que les sursauts gamma, pistés par un réseau de télescopes pour l'astronomie des rayons gamma à très hautes énergies, seront aussi développées.

3. Quelques développements formels

La recherche de symétries sous-jacentes et de leurs manifestations est un domaine foisonnant. Ces symétries sont à la base de la formulation des forces et de l'agencement en groupes des briques de la matière. Elles ont non seulement un impact phénoménologique (découverte de nouvelles particules) mais elles permettent aussi, via l'exploitation de leurs propriétés mathématiques, des calculs plus précis et donc une confrontation avec les données expérimentales à un niveau inégalé. Ces dernières années l'étude de certains systèmes en théorie des champs a révélé des symétries insoupçonnées. De plus, dans certaines limites, le système s'apparente à un système intégrable. De puissantes techniques ont été développées pour résoudre les systèmes intégrables. Ainsi, une reformulation préalable d'au moins une composante du Lagrangien du modèle standard (chromodynamique quantique) pourrait mener à de nouvelles méthodes de calculs de certaines amplitudes de diffusion applicables à des processus du LHC. C'est un sujet en plein développement.

Dans une autre perspective, force est de constater que les calculs théoriques mis en jeu pour arriver à des prédictions précises deviennent ardues avec des étapes intermédiaires complexes, alors que le résultat final peut être assez compact. Il se pourrait que les principes fondamentaux, à la base dans nos théories, par exemple l'unitarité nécessaire pour une description probabiliste en théorie quantique, les symétries, etc., soient autant de contraintes qui rendent ces calculs difficiles. Ces principes seraient-ils émergents ? Avec le concept d'émergence, les propriétés de l'ensemble ne sont pas réductibles à celles de ses parties, en opposition avec les approches réductionnistes à la base de l'approche traditionnelle des physiciens. Ce concept a été popularisé par P. Anderson dans son article « More is different

» en 1972, et peut être invoqué aussi en ce qui concerne les phénomènes multiéchelles par exemple (§VII.3). Les approches émergentes pourraient s'avérer enrichissantes dans de nombreux domaines de la physique des solides ou des fluides (supraconductivité, superfluidité, etc.). Il a aussi été proposé que la gravité ne serait pas une interaction fondamentale mais un phénomène émergent qui résulte d'une évolution statistique. Cette piste de recherche, si elle est avérée, pourrait permettre de réconcilier relativité générale et physique quantique, voire conduire à une meilleure compréhension des notions de masse, d'espace-temps et de vide.

4. Une recherche basée sur des collaborations internationales à long terme

Le domaine de physique qui est couvert dans ce paragraphe III touche les fondements ultimes de la physique, depuis les plus petites aux plus grandes échelles, amenant certains à parler de physique des deux infinis. Si l'on se cantonne à la dernière décennie, cinq prix Nobel de physique ont été décernés dans le domaine. Les outils expérimentaux mis en jeu font appel à de grandes collaborations internationales, qui requièrent un soutien financier sur une longue durée. Sur le plan français, et au CNRS en particulier, le domaine se trouve principalement réparti entre 3 instituts (l'IN2P3, l'INSU et l'INP et dans une moindre mesure l'INSMI). Même si la contribution française jouit d'une grande visibilité, il est essentiel de renforcer, et plus important encore, de coordonner les actions de ces instituts dans cette thématique. Une concertation entre ces instituts, et même au-delà des instituts, au niveau de l'organisme, devrait être menée sur une stratégie pluriannuelle du recrutement des jeunes chercheurs, notamment théoriciens.

IV. Lumière et matière.

Les sciences liées à l'interaction entre matière et rayonnement bénéficient d'avancées technologiques révolutionnaires. Certaines ont été récompensées par le prix Nobel de physique 2018, attribué à l'américain Arthur Ashkin pour les pinces optiques, ainsi qu'à la canadienne Donna Strickland et au français Gérard Mourou pour la production d'impulsions laser ultra-brèves et intenses. Ces sciences couvrent un vaste domaine allant de la physique des sources de lumière à la compréhension et à la manipulation de plus en plus fine de la matière (atomes, molécules, matière condensée) et de la lumière. Elles permettent la production et l'étude de la matière dans des conditions extrêmes et/ou l'étude de sa dynamique sur des échelles de temps aussi brèves que quelques attosecondes (quelques 10^{-18} s). Leur champ d'application est large et dépasse les frontières de la seule physique. Un exemple en est le développement de nouvelles techniques d'imagerie optique pour la biologie.

1. Optique, photonique et plasmonique

Les sciences optiques et photoniques sont à l'origine d'importantes avancées fondamentales et d'applications issues de l'optique non linéaire et ultrarapide, de l'optique quantique, des fibres optiques et de l'optique guidée et de champ proche.

Parmi ces avancées, l'observation d'ondes scélérates dans des fibres optiques a engendré une nouvelle thématique portant sur l'étude des événements rares et complexes apparaissant dans différents systèmes photoniques (lasers, cristaux, fibres optiques). Plusieurs groupes de recherche français font partie des leaders mondiaux dans ce domaine. L'aspect quasi-universel des phénomènes scélérats a renforcé l'intérêt que portent les chercheurs aux analogies qui peuvent être établies entre photonique et hydrodynamique, par exemple avec les polaritons de cavité et l'hydrodynamique superfluide.

Les fibres multimodes sont intéressantes tant pour le multiplexage en mode spatial et pour les télécommunications à très haut débit que pour les nouvelles perspectives qu'elles offrent pour

l'exploration du couplage non linéaire des effets temporels et spatiaux. Ces fibres ont permis récemment la première observation de solitons femtoseconde multimodes. Par ailleurs, l'auto-organisation de la lumière dans les fibres optiques multimodes (ou autonettoyage de faisceau laser) pourrait faire sauter un verrou qui limite le développement des lasers fibrés de puissance. Le couplage de modes non linéaires peut être exploité pour une nouvelle génération de dispositifs à fibre optique permettant la génération et la manipulation de faisceaux optiques de haute énergie pour diverses applications : sources lasers à verrouillage de mode, super-continuum à faisceau stable, découpe industrielle et soudage, et imagerie biomédicale.

La génération et la mise en œuvre de peignes de fréquence dans les microrésonateurs est une activité de recherche en forte croissance. Ces peignes de fréquence, essentiels en métrologie temps-fréquence (voir § VII.1), permettent également de réaliser des mesures ultra-précises pour, par exemple, détecter des exoplanètes ou réaliser des LIDAR (Light Detection And Ranging) compacts et de précision. Le défi qui reste à relever réside dans la réalisation des peignes de fréquence double au sein d'un même dispositif afin de gagner en précision.

L'excitonique, science du contrôle des excitons dans les dispositifs quantiques, a pris un essor tout particulier ces dernières années. Elle ambitionne le développement de nouveaux dispositifs à l'interface lumière/matériau solide (diodes électroluminescentes, cellules solaires et photodétecteurs, lasers, modulateurs...) où il existe un fort enjeu sociétal et environnemental, notamment dans le domaine du photovoltaïque (voir aussi § V) et de l'éclairage. Les semiconducteurs désordonnés et/ou à basse dimensionnalité, au premier rang desquels les semiconducteurs organiques, les pérovskites hybrides et les boîtes quantiques colloïdales, sont des matériaux qui ont en commun leurs propriétés optiques (spectres accordables dans le domaine visible, importance du confinement) et leur potentiel technologique, avec des méthodes modulables de mise en œuvre par voie liquide « bas coût ». Enfin, le développement de techniques de communication quantique (§ VIII.1) va nécessiter la réalisation de sources de photons uniques identiques avec un débit augmenté, des relais, interfaces et portes logiques photoniques intégrées. Des laboratoires français sont à la pointe de ces recherches.

Le domaine de la plasmonique a aussi connu un essor important ces dernières années grâce aux progrès réalisés sur la synthèse de nanostructures, la mesure (notamment par spectroscopies optique et électronique, voir aussi § VII.3) et la modélisation de leurs propriétés physiques. Le développement de sources d'impulsions attosecondes dans l'ultra-violet lointain permet aujourd'hui de suivre la formation et l'atténuation des plasmons directement dans le domaine temporel. Dans le cas de nanostructures de très petite taille ou séparées de leurs voisines par des distances subnanométriques, une approche quantique devient indispensable (« nanoplasmonique quantique »)). Enfin, la thermoplasmonique (c'est-à-dire la génération de chaleur dans les structures plasmoniques consécutive à l'absorption lumineuse) est un champ de recherche particulièrement actif. Il permet une étude fondamentale des modalités du transfert de chaleur à l'échelle nanométrique, ainsi que le développement de multiples applications dans des domaines variés : énergie, traitement de l'eau, santé... En particulier, les thérapies photothermales du cancer à base de nanoparticules plasmoniques, qui ont démontré leur efficacité dans le cadre d'études sur de petits animaux, se rapprochent d'une utilisation pour soigner les cancers humains.

2. Physique atomique et moléculaire

Les développements récents de la physique atomique ont permis la manipulation des atomes à un degré sans précédent, que ce soit au niveau de la particule unique ou d'un ensemble d'atomes ultrafroids dans le régime des gaz quantiques (condensats de Bose-Einstein, mers de Fermi d'atomes ou mélanges d'espèces aboutissant à des gaz quantiques de molécules).

Le domaine est arrivé à un stade de maturité et se développe autour de deux axes principaux dans lesquels les laboratoires français impliqués sont excellents.

D'une part, les gaz quantiques, avec leurs paramètres ajustables dans une large mesure (interactions, désordre, dimension...), forment des systèmes modèles pour étudier expérimentalement des problèmes à N-corps difficiles à résoudre par le calcul. Après les premiers succès en termes de détermination expérimentale de l'équation d'état à l'équilibre (gaz de Fermi unitaire, gaz de Bose en dimension deux), auxquels les groupes français ont largement contribué, les expériences abordent à présent les systèmes hors équilibre et la dynamique. De plus, les systèmes hybrides alliant atomes et nanostructures photoniques ou supraconductrices sont en plein essor, avec le rapprochement des communautés de physique atomique et de matière condensée (voir aussi § V.2, V.3 et VIII.1). La complexité des systèmes expérimentaux s'est accrue ces dix dernières années, le montage d'une expérience excédant souvent la durée d'une thèse et nécessitant un financement sur la durée et une forte implication de personnels permanents.

D'autre part, l'un des points forts de la physique atomique et moléculaire concerne les mesures de précision pour tester la physique fondamentale (symétries, interactions). Cela inclut par exemple la recherche de la violation de la symétrie de parité (notamment dans les molécules chirales) ou du principe d'équivalence d'Einstein, la recherche d'un moment dipolaire de l'électron, d'une dérive éventuelle des constantes fondamentales comme la constante de structure fine ou le rapport de masse de l'électron et du proton, ainsi que la mesure du rayon de charge du proton, de l'effet de la gravité sur l'antihydrogène et la détection d'ondes gravitationnelles. Ces tests fondamentaux sont rendus possibles par des progrès instrumentaux remarquables dans le domaine des mesures de précision qui seront abordés au § VII.1.

Le domaine de la physique moléculaire est transformé par le développement de nouveaux outils expérimentaux, parmi lesquels les lasers à électrons libres (LCLS aux Etats-Unis, European XFEL à Hambourg, etc.) délivrant des impulsions de rayonnement X extraordinairement intenses et de durée très courte (femtoseconde, 10^{-15} s), par des outils combinant des longueurs d'ondes variées entre 1 et 10^5 nm (synchrotrons, etc.), et bien sûr par le développement de la science attoseconde qui donne accès aux échelles de temps du mouvement des charges à l'échelle atomique. En dynamique ultrarapide, la France compte des groupes leaders au niveau mondial.

Parmi les sujets en émergence on peut citer :

- (i) les études autour de la chiralité d'un milieu en créant par exemple un courant d'électrons dans une molécule neutre.
- (ii) l'identification de la diffusion d'électrons dans des potentiels moléculaires ou en contrôlant les trajectoires électroniques, ce qui incite les théoriciens à développer des méthodes numériques complètes en réduisant le nombre d'approximations pour s'approcher au mieux de la description du potentiel moléculaire à longue portée.
- (iii) la caractérisation des interférences entre ondes partielles définissant le continuum d'ionisation. La haute cadence des mesures engendre des téraoctets de données, ce qui oblige le développement d'algorithmes d'analyse d'images par des approches de type réseau de neurones pour en extraire les informations.

Par ailleurs la physique moléculaire se tourne résolument vers les interfaces interdisciplinaires. Pour les molécules d'intérêt biologique en phase diluée, on s'oriente vers des systèmes de plus en plus grands et complexes en lien très étroit avec des problématiques soulevées par les biologistes. Ceci nécessite le couplage de plusieurs techniques expérimentales complémentaires avec notamment la spectrométrie de mobilité ionique couplée à la spectroscopie laser et/ou l'attachement électronique. Les développements récents ont porté sur les techniques spectroscopiques centimétriques et submillimétriques. Il convient de

poursuivre cet effort en particulier avec les technologies à dérive de fréquence qui permettront les études d'espèces très réactives et celles de la cinétique de certaines espèces. L'étude des gaz chauds pour les exoplanètes et les étoiles froides émerge également (50-3000K). Enfin, pour répondre à la problématique majeure du changement climatique, il s'agit aussi de quantifier les molécules atmosphériques en phase diluée. Les méthodes théoriques continuent à se développer, notamment par la prise en compte des effets de température finie dans les calculs de structure et de spectroscopie. Le calcul des états électroniques excités reste difficile et nécessite le développement d'approches multiéchelles temporelles.

3. Matière à haute densité d'énergie

L'étude de la matière à haute densité d'énergie connaît un essor sans précédent, associé au développement de très grands projets d'équipements nationaux et internationaux : des lasers de très forte énergie et/ou très intenses (délivrants des impulsions de lumière proche du domaine visible), des lasers à électrons libres (ou X-FEL délivrant des impulsions de rayons X), jusqu'au projet international ITER hébergé à Cadarache en France et qui vise à fabriquer une machine gigantesque pour la fusion thermonucléaire contrôlée. Les investissements sont énormes (des milliards d'euros pour certains) et la France est bien positionnée dans un contexte international très concurrentiel.

Ces outils offrent de nouvelles perspectives pour produire, souvent de façon transitoire, des conditions extrêmes de température et de pression. D'autres projets en cours de réalisation prévoient de les coupler à des impulsions X (issues de X-FEL ou de synchrotrons), rendant possible des études à l'échelle atomique qui est souvent la plus pertinente pour comprendre intimement la physique de la matière dans ces régimes extrêmes. Nous avons choisi ici de présenter quelques-unes des perspectives scientifiques qui motivent de tels efforts dans le domaine de la haute densité d'énergie.

Fusion thermonucléaire contrôlée

Le contrôle de la fusion thermonucléaire est un Graal de la physique. Il s'agit de reproduire sur terre, de façon maîtrisée, les réactions nucléaires entre éléments légers qui ont lieu dans notre soleil. Cela permettrait de produire de l'énergie à partir de combustibles accessibles en grandes quantités comme l'hydrogène, en réduisant significativement le problème des déchets radioactifs. La difficulté est de confiner assez longtemps un plasma dans des conditions propices pour ces réactions, notamment une température de plusieurs millions de degrés. Deux voies sont envisagées depuis plusieurs décennies et on espère qu'elles vont connaître d'importantes avancées : le confinement magnétique où le plasma chaud est confiné dans des lignes de champ (dans le réacteur ITER), ou un confinement dit « inertiel » qui utilise des lasers de très haute énergie pour chauffer et comprimer une petite bille de combustible pendant quelques nanosecondes (Laser MégaJoule – LMJ – récemment opérationnel en France et l'équivalent américain NIF – National Ignition Facility).

Une campagne expérimentale a été conduite au NIF entre 2009 et 2012. Elle n'est pas parvenue à démontrer l'allumage de la fusion par attaque indirecte (conversion du laser en rayonnement X dans une cavité, pour comprimer et chauffer le combustible). Elle a montré que certaines conditions physiques n'étaient pas encore bien maîtrisées et a replacé la recherche fondamentale en physique des plasmas au centre du programme. Ses résultats sont cependant extrêmement encourageants pour atteindre l'allumage dans les prochaines années, y compris avec des schémas alternatifs en attaque directe (le laser comprime et chauffe directement le combustible). L'ouverture au monde académique du Laser Méga-Joule construit par le CEA-DAM pour un programme de défense est un atout pour l'avancée de cette physique en France.

En ce qui concerne la fusion par confinement magnétique, la construction d'ITER va durer encore plusieurs années mais elle est accompagnée de plusieurs projets à plus petite échelle. En France, à Cadarache, le tokamak Tore Supra, transformé en WEST (pour Tungsten Environment in Steady-State Tokamak) permettra de tester plusieurs points scientifiques pour ITER. D'autres recherches seront conduites, sur le développement des diagnostics plasma et des codes de simulations pour le transport et la turbulence, et sur le contrôle en temps réel de la dynamique du plasma.

Astrophysique et planétologie de laboratoire

Des techniques sont développées pour étudier le comportement physique de la matière sous haute pression sous différents aspects : propriétés structurales, transitions de phase, propriétés électroniques ou magnétiques. Les enclumes à diamants permettent désormais de monter à des pressions de plusieurs mégabars. Des lignes de lumières sont dédiées à ces études, par exemple sur synchrotron (ESRF, SOLEIL, §VII.2). Les lasers de forte énergie présentent une alternative pour atteindre des pressions encore plus élevées au moyen d'une compression dynamique, avec un impact évident pour la planétologie (pressions proches du gigabar, comme au centre des grosses planètes). De façon plus générale, ces instruments permettent d'amener la matière dans une grande variété de conditions de haute densité d'énergie que l'on peut trouver dans différents systèmes astrophysiques : on parle d'astrophysique de laboratoire. Les moyens d'observations astronomiques ont été considérablement développés au cours de la dernière décennie, ce qui a abouti à une nouvelle vision de notre Univers, de sa formation, de son évolution et de ses transformations internes. Cependant, il reste de nombreuses questions scientifiques auxquelles les mesures spatiales ne peuvent pas répondre complètement.

On distingue trois types d'études en laboratoire : les « identiques » (conditions exactes rencontrées dans des objets astrophysiques tels que des intérieurs planétaires ou stellaires) ; les « similaires » (des lois d'échelle permettent de passer du laboratoire à la situation astrophysique) ; et les « semblables » dans lesquelles seuls certains processus physiques mis en jeu peuvent être étudiés. Grâce à son parc de lasers de puissance et à leur complémentarité (LULI2000, LMJ-PETAL et très bientôt Apollon), la France peut répondre à nombre de questions posées en astrophysique sur la physique des intérieurs planétaires de notre système solaire ou des systèmes extrasolaires comme sur les restes de supernovae qui sont les progéniteurs possibles d'étoiles. Comment le champ magnétique omniprésent dans l'univers est-il produit ? Comment les rayons cosmiques sont-ils produits et où ? Le développement de plateformes délivrant des champs magnétiques pulsés ouvre enfin des perspectives innovantes à l'étude des plasmas magnétisés en astrophysique.

Enfin, l'astrophysique de laboratoire ne se résume pas à la haute densité d'énergie. Une recherche active est aussi menée à basse température (~10 K) pour détecter de nouvelles espèces dans le milieu interstellaire, et mieux comprendre les modèles de leur formation. Ces études contribuent à déterminer des scénarios possibles de formation du système solaire, ou même de l'émergence de la vie sur Terre.

Nouvelle physique accessible avec les lasers de puissance

L'amplification à dérive de fréquence permet de produire des impulsions laser à la fois énergétiques et de très courte durée (femtoseconde). Fruits directs de cette révolution, de nouveaux systèmes vont très bientôt délivrer des impulsions lasers avec des intensités record après focalisation : jusqu'à 10^{22} W/cm² ou plus pour Apollon (plateau de Saclay) et les ELI (projet européen Extreme Light Infrastructure), soit plusieurs ordres de grandeur au-delà de l'existant. Ceci ouvre de nombreuses perspectives à la fois dans le domaine de la physique fondamentale, dans celui de la physique des plasmas relativistes incluant certains plasmas

astrophysiques, et dans le domaine des sources intenses et brèves de particules énergétiques et de rayonnement.

Déjà complexe avec des intensités modérées, l'interaction laser-plasma dans ce nouveau régime fait intervenir des mécanismes nouveaux dont l'étude est un défi de taille : l'énergie atteinte par les électrons est très supérieure à leur énergie au repos voire ultra-relativiste, et les protons peuvent également devenir relativistes. La physique en jeu fait intervenir des mécanismes d'électrodynamique quantique en champ fort. Ces mécanismes, comme le freinage radiatif, peuvent modifier sensiblement le comportement du plasma.

Les nouvelles installations du niveau pétawatt (1 PW = 10^{15} W) ou multi-PW permettront de produire des sources brèves et intenses de particules et de rayonnement. En ce qui concerne les électrons, il sera notamment possible de tester leur accélération jusqu'à plus de 10 GeV à partir d'un laser. Pour les protons, les calculs actuels prévoient la production de faisceaux de plusieurs GeV grâce à des mécanismes spécifiques à ces nouveaux régimes d'intensités très élevées. Dans une deuxième étape, l'interaction de faisceaux énergétiques d'électrons et d'ions avec un deuxième faisceau laser intense ou avec des cibles dédiées permettra de produire des faisceaux brefs de rayons X et de particules issues de réactions nucléaires, comme des neutrons de forte énergie. À terme, ces sources issues d'un laser pourraient devenir de réelles alternatives aux accélérateurs conventionnels actuels.

4. Interface optique-biologie

L'imagerie optique, largement utilisée dans les domaines fondamentaux et appliqués, et en particulier en biologie, est aujourd'hui mise au défi de surpasser ses performances. Elle doit notamment permettre de quantifier des propriétés physiques / chimiques / biologiques intriquées et complexes avec une haute résolution spatio-temporelle, de la molécule unique à l'animal entier. Cela a conduit au développement de nouvelles techniques de microscopie de pointe, auquel les laboratoires français ont apporté des contributions de premier plan. La mise en œuvre de la microscopie non linéaire à deux photons en 1990 a ouvert la voie à l'imagerie en profondeur dans les tissus. La technique a récemment été étendue à trois photons, donnant accès à des profondeurs plus importantes qui permettent d'envisager à court terme l'imagerie du cerveau à travers la boîte crânienne. Le premier défi à surmonter est celui du développement de nouvelles sources laser optimisées pour cette excitation à trois photons. Pour atteindre des profondeurs de plusieurs millimètres, les développements récents s'articulent autour de l'ingénierie de front d'onde qui permet, grâce à des modulateurs spatiaux de lumière, de focaliser en profondeur la lumière diffusée. Ici les défis concernent : la vitesse d'acquisition d'image, pour pouvoir l'appliquer en temps réel à des milieux biologiques et ultimement dans un contexte intra-opératoire ; le développement de « signaux guides » pour la mise au point en profondeur dans le milieu, par exemple par un couplage avec l'acoustique ; l'amélioration des algorithmes de traitement d'image. Les techniques de contrôle de front d'onde ont également permis une percée fulgurante dans le domaine de l'endoscopie non linéaire utilisant des fibres multimodes.

Outre sa capacité à imager en profondeur, la microscopie optique 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 détecte les systèmes denses et non centrosymétriques (collagène fibrillaire, filaments de myosine...). La génération de troisième harmonique 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.). On peut de surcroît combiner ces méthodes avec des approches polarimétriques pour étudier 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 par point en utilisant la microscopie à nappe de lumière (« light-sheet microscopy »). Cette approche suscite un grand intérêt en biologie, et la recherche en optique et instrumentation est très active. On peut mentionner notamment la combinaison de l'approche à nappe de lumière avec les microscopies de super-résolution, et le développement de la microscopie à nappe de lumière multiphotonique.

Ces dernières années ont été marquées par de grandes avancées 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 et STORM (prix Nobel de chimie en 2014). Les principales applications ont été réalisées en biologie cellulaire, en particulier sur des systèmes cellulaires isolés. Un des défis pour le futur sera de combiner la super-résolution avec l'imagerie *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 nouvelle méthode permet de contrôler par la lumière l'activité de neurones génétiquement modifiés, qui produisent alors des protéines photo-activables. Elle a révolutionné les neurosciences en ouvrant la voie à la possibilité de manipuler optiquement les circuits neuronaux afin d'étudier leur rôle dans la sensation, la perception et les fonctions cognitives. Les développements dans ce domaine concernent l'amélioration de la résolution spatiale et temporelle pour obtenir le contrôle rapide de centaines de cellules avec la précision de la cellule unique sur une échelle temporelle de la milliseconde afin d'arriver à « jouer du cerveau comme d'un piano ».

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 Etats-Unis d'une communauté interdisciplinaire regroupant des compétences complémentaires en photonique, nanosciences, biologie moléculaire, chimie et neurosciences. Plusieurs équipes françaises sont aujourd'hui parmi les leaders mondiaux dans ces différents domaines, entre lesquels l'interdisciplinarité doit être développée plus encore.

V. Matière condensée et nanosciences.

L'élaboration des matériaux, éventuellement sous forme nano-structurée, l'étude de leurs propriétés structurales, dynamiques, électroniques, leur modélisation jusqu'à une mise en œuvre potentielle sont au cœur de la science de la matière condensée. La multitude, la richesse et la diversité des études menées sont à souligner. La séparation entre physique des matériaux massifs d'un côté et nanosciences de l'autre, qui s'était produite progressivement dans les années 1990, est actuellement en train de disparaître et nous avons donc rassemblé des domaines dans le présent paragraphe.

Le domaine de la matière condensée est interdisciplinaire par excellence avec des recouvrements non seulement avec la chimie, les mathématiques et l'informatique, mais aussi avec la géologie, les sciences de la terre, la biologie, la toxicologie, la médecine ou le génie civil et électrique. Il fait appel aux techniques de synthèse et d'élaboration de la chimie du solide comme à la « chimie douce », selon les matériaux concernés. L'étude de la structure des (nano-)matériaux et de leurs défauts, basée sur les notions d'ordre et de désordre à différentes échelles, du nanomètre jusqu'au micron, sur les concepts de symétries et sur la cristallographie est extrêmement active. Elle utilise des sondes empruntées à l'optique, avec des outils de microscopie électronique dont la performance est en progrès constant ou en utilisant, par exemple, la diffraction des rayons X et des neutrons (sur des sources de laboratoire ou des grands instruments type synchrotron, réacteurs à neutrons, etc.), comme

discuté au §VI.2 et VI.3. La connaissance des (nano-)matériaux est fondamentale pour explorer, comprendre et contrôler leurs propriétés électroniques, mécaniques, thermiques, etc. Cette compréhension est basée sur les outils d'étude de structure électronique et des phonons (vibrations des atomes) de la physique des solides, sur des outils de physique statistique à l'équilibre ou hors équilibre (§VII.4), sur les concepts de symétrie et de topologie⁶, sur les simulations numériques (simulations *ab initio*, dynamique moléculaire, Monte-Carlo) et sur des développements théoriques constants. L'utilisation accrue de méthodes couplant plusieurs techniques et l'étude simultanée de différentes propriétés s'avère aussi fructueuse. La physique des matériaux s'étend des questions les plus fondamentales jusqu'aux applications, sur des problématiques aussi variées que l'organisation de la matière en biophysique, l'assemblage de nanomatériaux en dispositifs, les matériaux composites ou les matériaux à l'intérieur de la terre. Les équipes CNRS de l'INP travaillant dans le domaine de la science des matériaux sont reconnues internationalement et savent le plus souvent développer des approches interdisciplinaires avec, en particulier, des collaborations fructueuses avec les autres instituts du CNRS (INSIS, INC, INSB, INSHS...).

1. Spintronique et magnétisme

Des progrès particulièrement significatifs pour notre vie de tous les jours ont été réalisés ces dernières décennies dans le domaine à l'intersection du nanomagnétisme et de la spintronique. La magnétorésistance géante, récompensée par le prix Nobel de physique pour Albert Fert et Peter Grünberg en 2007, et par le Millennium Technology Prize pour Stuart Parkin en 2014, a permis d'augmenter la capacité des disques durs. La communauté scientifique française des couches minces et nanostructures magnétiques est extrêmement dynamique et bien structurée autour du colloque Louis Néel⁷ soutenu par l'INP.

Rappelons que l'on entend par spintronique (ou électronique de spin) l'ensemble des phénomènes mettant en jeu le rôle du spin sur les propriétés de transport électronique. Les dernières années ont vu un renouvellement assez important des thèmes de recherche en magnétisme de la matière. L'interaction physique à la base de ces thèmes n'est pas nouvelle : il s'agit de l'interaction spin-orbite qui couple le magnétisme associé au spin des électrons à celui provenant de leur mouvement orbital. La nouveauté réside plutôt dans les matériaux qui sont étudiés, allant au-delà des métaux et alliages à base de Fe, Co ou Ni, et à la volonté d'exploiter cette interaction plutôt que de s'en affranchir.

Nous pouvons citer l'essor de nouvelles thématiques, avec les études :

- (i) des skyrmions qui sont une nouvelle configuration de spin protégée topologiquement, ce qui rend cet état particulièrement robuste. Ces skyrmions peuvent s'organiser en réseau sous certaines conditions de température et de champ magnétique. Ils pourraient donc être utilisés dans des applications liées au stockage ou au traitement de l'information. L'intérêt applicatif de ce type de structures vient du fait qu'il faut beaucoup d'énergie pour les détruire alors que l'on peut les déplacer facilement. Le développement d'une instrumentation comme la microscopie à centre azote-lacune dans le diamant pour la caractérisation du magnétisme de nano-objets à l'échelle atomique est particulièrement

⁶ La topologie est une branche des mathématiques qui s'intéresse aux déformations spatiales par des transformations continues et aux propriétés générales (non métriques) d'objets indépendamment de leurs déformations. Ce n'est que dans les années 1970 que la topologie a fait son « apparition » dans le domaine de la physique. Le prix Nobel de physique 2016 a été attribué à D. Haldane, M. Kosterlitz et D. Thouless pour leurs "découvertes théoriques des transitions de phase topologiques et des phases topologiques dans la matière". Ordre topologique caché, matériaux topologiques, protection topologique : la topologie est maintenant partie intégrante de la physique !

⁷ Le colloque Louis Néel réunit sur 3 jours plus de 200 chercheurs français tous les 18 mois depuis le début des années 90, pour faire un bilan des avancées récentes en nanomagnétisme et en électronique de spin, et promouvoir les travaux des jeunes chercheurs en présence d'experts du domaine.

adapté à ces structures présentant une inhomogénéité d'aimantation à très courte échelle. La mesure par voie optique de l'effet Zeeman dans le centre azote-lacune permet d'utiliser celui-ci comme une sonde locale et ultra-sensible. Les équipes françaises sont extrêmement actives dans le domaine des skyrmions.

- (ii) des matériaux antiferromagnétiques et de leur spintronique, jusque-là relativement peu explorée. Ces matériaux pourraient apporter des solutions dans le domaine du stockage de l'information ou pour la montée en fréquence des dispositifs micro-ondes.
- (iii) des couples exercés sur l'aimantation par un courant de spin, induit par un courant de charge électrique circulant dans un matériau non magnétique adjacent via le couplage spin-orbite, avec application à une nouvelle génération de mémoire.
- (iv) d'un effet, qui peut être vu comme l'inverse du précédent, dans lequel un courant de spin induit un courant de charge, toujours via le couplage spin-orbite.
- (v) des modifications des propriétés magnétiques de systèmes hybrides par une excitation externe peu coûteuse énergétiquement (type optique ultrarapide, champ micro-onde, tension électrique, température, contrainte mécanique...)
- (vi) des nanoparticules qui ont des tailles de l'ordre de la dizaine de nanomètres, intéressantes pour leurs propriétés magnétiques, magnétoplasmoniques, multiferroïques ou théragnostiques, c'est-à-dire alliant diagnostic et thérapie.

L'exploration de ces nouveaux matériaux demande des développements essentiels en synthèse de composés de plus en plus complexes par des approches physiques « top-down » ou « bottom-up ».

La recherche de matériaux dont les propriétés magnétiques peuvent être contrôlées par des champs électriques et inversement est un enjeu d'importance tant du point de vue fondamental que de celui des applications comme le stockage ou le traitement de l'information. Ainsi, il est apparu que les états d'ordre magnétique non conventionnels liés à la frustration magnétique dans certains oxydes pouvaient induire des polarisations électriques. Les matériaux multiferroïques suscitent depuis une dizaine d'années un grand intérêt en recherche fondamentale et sont au centre d'une activité très dynamique tant théorique qu'expérimentale. L'utilisation des effets magnétoélectriques dans la future brique de commutation qui se substituera au transistor pour permettre le fonctionnement de dispositifs de calcul ou de mémoires à très faible consommation est envisagée.

On peut citer deux autres aspects importants du magnétisme, qui sont capitaux pour les applications dans le domaine de l'énergie, avec

- (i) les matériaux magnétocaloriques qui ouvrent la voie à la réfrigération magnétique, potentiellement plus efficace énergétiquement et plus respectueuse de l'environnement que la réfrigération par compression. L'effet magnétocalorique étant amplifié à proximité d'une transition ferromagnétique, l'enjeu pour des applications de réfrigération ou de pompe à chaleur est de disposer de matériaux dont la température de Curie est proche de l'ambiante. Dans ce domaine, une activité soutenue est consacrée à la recherche de matériaux plus performants que les alliages à base de terres rares et constitués d'éléments moins onéreux et peu toxiques.
- (ii) les aimants permanents, dans le contexte de l'explosion de la demande et de la limitation des ressources, avec une recherche de nouveaux aimants permanents eux aussi sans terres rares. En effet, les composés magnétiques durs actuellement connus, tels que le SmCo_5 ou le $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, contiennent une quantité significative de ces éléments coûteux. L'usage quasi exclusif de technologies à base de terres rares peut conduire à des problèmes d'approvisionnement liés à la concentration géographique des ressources minières, ainsi qu'à des problèmes écologiques liés au cycle de vie des produits (recyclage des déchets). Il est donc important de soutenir une recherche visant à identifier de nouveaux matériaux, un enjeu étant de s'affranchir le plus possible des terres rares.

2. Métallurgie et nanomécanique

Les alliages traditionnellement utilisés en métallurgie sont basés sur un élément majoritaire. Une nouvelle classe d'alliages est apparue en 2004 : les alliages à haute entropie, alliages quasi-équiatomiques (formés d'au moins cinq éléments) où l'entropie de mélange contrebalance l'enthalpie de mélange, avec des propriétés mécaniques (résistance et ductilité) extrêmement prometteuses. Dans ces alliages, l'architecture à un niveau microscopique et la diffusion des espèces atomiques sont fondamentales pour les propriétés d'emploi. L'étude des cinétiques de séparation de phases pilotant la genèse des microstructures fait l'objet de nombreuses recherches faisant le lien entre expériences utilisant les instruments à leurs limites ultimes (microscopie électronique et tomographie électronique, sonde atomique tomographique, §VII.3) et modélisation (Monte-Carlo, champ de phase, dynamique moléculaire, calculs sur la base des premiers principes). Soulignons le rôle croissant des grands instruments (rayons X et neutrons, §VII.2) pour des études de cinétique *in situ* et *operando* jusqu'aux hautes températures. L'évolution des calculs thermodynamiques, de la modélisation multiéchelle (§VII.3), l'émergence des outils issus de l'intelligence artificielle (§VIII.2), laissent entrevoir une convergence avec les techniques d'élaboration de bibliothèques d'alliages à haut débit et les techniques de caractérisation correspondantes, qu'il faudrait renforcer. Dans le domaine des nanosciences, il s'agit d'appréhender les transitions de phase dans des espaces confinés de quelques nm³ (par exemple, amas d'atomes induits par implantation de dopants dans les nanotransistors), ce qui pose des problèmes nouveaux. On peut aussi mentionner les progrès récents en ingénierie avec la fabrication additive (impression tridimensionnelle (3D)). Des poudres d'alliages disposées sur un substrat sont fondues par un faisceau laser en produisant une pièce aux formes prédéfinies. L'utilisation de ce nouveau procédé, dont l'exploitation industrielle progresse rapidement, soulève des questions tout à fait fondamentales (métastabilité des phases formées, contraintes résiduelles...) qui suscitent des travaux tant sur le plan instrumental que théorique.

Grâce aux progrès considérables des techniques de nanofabrication, les systèmes nanomécaniques ont connu un essor très important au cours des deux dernières décennies et ont permis d'alimenter des recherches fondamentales et appliquées très fécondes. Ces développements se sont particulièrement intensifiés il y a une dizaine d'années, avec l'émergence de nouvelles méthodes de détection (grâce notamment à des dispositifs optiques et micro-ondes) extrêmement efficaces, qui ont permis d'étendre le paradigme de mesures ultra-sensibles aux nanosystèmes.

Dans le domaine de la nanomécanique, trois grandes tendances semblent se dégager qui portent sur les études suivantes :

- (i) les effets de la mesure sur l'état de vibration des systèmes nanomécaniques. Il s'agit de déterminer comment la mesure influe sur les vibrations des systèmes mécaniques que l'on cherche à détecter. Un grand nombre d'expériences sont en cours de développement au niveau mondial afin d'exalter cette influence, en minimisant le rôle des fluctuations thermiques (expériences à basse température), en optimisant le couplage à la sonde de mesure (nanofabrication, mécanisme de couplage) et en maximisant l'impact de la sonde elle-même (mesures à forte puissance).
- (ii) les propriétés thermodynamiques des systèmes nanomécaniques qui ont une faible masse et présentent l'avantage d'être liés à leur environnement, ce qui permet d'accéder à une physique encore largement inexplorée, celle des systèmes harmoniques (et polyharmoniques) non linéaires.
- (iii) la fonctionnalisation de systèmes nanomécaniques permettant de coupler leur très grande sensibilité avec d'autres propriétés spécifiques sans trop les affecter. Ainsi, en s'inspirant des concepts établis avec les atomes et les photons, ces systèmes ont pu être couplés à plusieurs types de systèmes quantiques élémentaires (molécules, atomes, émetteurs uniques, qu-bits supraconducteurs), démontrant les capacités d'ingénierie de tels systèmes hybrides. Un nombre croissant d'équipes de recherche se sont engagées dans

cette voie, avec comme domaines d'application (parmi d'autres) l'optoélectronique quantique, la micro-nanofluidique (§VI.2), le magnétisme, le transport électronique, la nanothermique et la biophysique.

Le principal défi technologique est lié à la conception et la réalisation de systèmes avec de très faibles pertes optiques et mécaniques. D'un point de vue fondamental, de nouvelles questions émergent, notamment concernant les mécanismes responsables de la dissipation à l'échelle nanométrique, l'influence des interactions multimodes sur la dynamique des fluctuations, l'intrication quantique, les différences liées à la nature de la sonde (fermionique/bosonique) du point de vue d'une mesure continue macroscopique, les effets de la gravité sur des systèmes ultra-cohérents...

Enfin les systèmes nanomécaniques représentent un enjeu stratégique puisqu'ils apparaissent comme un successeur logique, naturel et ambitieux, des systèmes microélectromécaniques omniprésents dans la production industrielle moderne. L'accumulation en amont de connaissances fondamentales et technologiques sur ce sujet est donc indispensable. Des retombées dans le domaine de la métrologie (temps/fréquence) peuvent être attendues.

3. Nanoélectronique quantique et matériaux bidimensionnels

Les progrès considérables dans la manipulation et le contrôle de nanoobjets individuels, incluant le contrôle d'objets individuels tels que des électrons, des spins, des molécules devraient permettre la description et le contrôle quasi parfait d'un système quantique individuel envisagé pour des applications dans le domaine de l'électronique quantique.

Alors qu'au cours des deux dernières décennies, la nanoélectronique quantique a essentiellement été réalisée à basses fréquences, le domaine s'élargira à l'avenir vers des fréquences de plus en plus élevées. Dans la gamme des GHz et au-delà, ces fréquences deviennent comparables aux échelles de temps caractéristiques qui définissent la dynamique quantique des dispositifs, ouvrant de nouvelles possibilités pour étudier les aspects dynamiques de la physique quantique. Comme les échelles de temps sont au-delà de ce qui est actuellement atteignable avec l'électronique radiofréquence standard, une nouvelle instrumentation devra être développée.

Un aspect important dans le domaine de la nanoélectronique quantique est le développement et l'ingénierie de nouveaux matériaux quantiques. Des percées importantes ont récemment été réalisées avec des matériaux à basse dimension. Les progrès spectaculaires sur le contrôle des propriétés électroniques du graphène ont stimulé la recherche de nouveaux matériaux bidimensionnels (2D). Ce domaine est en pleine effervescence au niveau mondial avec des matériaux 2D aux propriétés semi-conductrices comme les dichalcogénures de métaux de transition (MoS_2 , WSe_2 , PtSe_2 , ...), le phosphore noir ou le nitrure de bore, des matériaux aux propriétés ferromagnétiques (CrI_3 , $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$, VSe_2 , MnSe_2 ...) ou supraconductrices (NbS_2 , NbSe_2 ...). On compte également de plus en plus d'études sur des structures du type GaSe , Bi_2S_3 , etc. Le développement de cette thématique se caractérise donc par une très grande diversité des matériaux étudiés, sans qu'il soit pour l'instant possible de dégager les plus prometteurs. Dans ce contexte et face à une compétition internationale féroce, il est essentiel de soutenir et développer nos compétences en croissance des matériaux.

Jusqu'à récemment, pour isoler une monocouche de ces matériaux souvent lamellaires à l'état massif, on utilisait la technique d'exfoliation mécanique mise au point pour le graphène au début des années 2000. Cependant cette technique présente de fortes limitations en termes de taille de feuillets, souvent restreints à quelques dizaines de μm^2 . D'importants efforts de recherche sont en cours pour fabriquer des feuillets de plus grande taille à partir de leurs composants fondamentaux par épitaxie par jet moléculaire, sous ultravide, ou bien en phase

vapeur, éventuellement à l'aide de catalyseurs. Le terme d'épitaxie de van der Waals (en référence à l'interaction de type van der Waals entre le substrat et le matériau déposé) souligne la nouveauté de la méthode du point de vue de la physique. Parallèlement, le développement de techniques de report de grandes surfaces permet de transférer ces matériaux 2D épitaxiés vers des substrats adaptés à certaines applications.

Les premiers résultats sur les nouvelles propriétés électroniques, de spin et optiques des monocouches à base de ces matériaux 2D sont aujourd'hui suffisamment encourageants pour envisager la fabrication d'empilements contrôlés de monocouches de différents matériaux 2D, liées entre elles par des interactions de van der Waals, en combinant les techniques d'épitaxie et de report mentionnées ci-dessus. Ces nouvelles hétéro-structures pourront avoir des propriétés de transport différentes de leurs constituants élémentaires telles que la supraconductivité ou le comportement isolant de Mott⁸. Elles pourront être conçues à la demande en fonction des propriétés visées pour aboutir à une grande variété de dispositifs multifonctionnels innovants.

D'autres exemples intéressants de nouveaux matériaux quantiques sont les systèmes topologiques⁶. Ces matériaux se caractérisent par une protection intrinsèque contre les perturbations externes. Ils pourraient constituer la base de la prochaine génération de dispositifs électroniques. Cela inclut également les matériaux hybrides qui sont obtenus en interconnectant différents matériaux qui surpassent les performances des matériaux individuels. Le développement et la compréhension de ces nouveaux matériaux quantiques pourraient trouver des applications dans des domaines aussi variés que la spintronique, le photovoltaïque, la piézoélectricité ou la thermoélectricité, pour n'en nommer que quelques-uns. D'un point de vue stratégique, il est ainsi primordial d'avoir accès à des matériaux quantiques de qualité en France ou en Europe.

4. Energie et matériaux fonctionnels

Les matériaux pour l'énergie couvrent un vaste panel d'applications que ce soit pour la production, la conversion ou le stockage de l'énergie. Un grand nombre de phénomènes sont étudiés : la thermoélectricité, le photovoltaïque ou la réfrigération magnétique. L'optimisation des aimants permanents est aussi d'actualité. D'autres aspects concernent la conduction ionique, les composés pour batteries au lithium et pour le stockage de l'hydrogène.

Dans le domaine de la thermoélectricité, les enjeux concernent aussi bien la compréhension des modes de phonons (§ VII.2) que l'optimisation des propriétés de conductivité thermique qui en résultent. L'utilisation des effets thermoélectriques pour la génération d'électricité en recyclant la chaleur est particulièrement intéressante dans la gamme des températures moyennes (maximum 400°C). L'exploration de nouveaux matériaux aux propriétés spécifiques (par exemple les composés à cages, les clathrates) constitue une voie prometteuse, tant du point de vue fondamental que des retombées potentielles. Un enjeu important pour la recherche dans ce domaine est la compréhension de la dynamique du réseau, en particulier celle de la diffusion des phonons dans un potentiel anharmonique.

Le stockage de l'hydrogène par voie solide est une des solutions envisagées pour la gestion de l'intermittence des sources d'énergie renouvelable. Le but poursuivi dans ce domaine est la recherche et le développement d'hydrures interstitiels, aux propriétés adaptées à des utilisations spécifiques (stockage réversible ou non, capacités de stockage), sur la base d'études de la thermodynamique et de la cinétique des processus de fixation de l'hydrogène. Ces études requièrent des caractérisations physiques fines et poussées avec des techniques complémentaires (Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), diffusion des neutrons, techniques synchrotron, etc.).

⁸ On appelle isolant de Mott un matériau qui est isolant du fait des corrélations électroniques.

Depuis la découverte en 2012 des performances exceptionnelles des cellules photovoltaïques à base de pérovskites hybrides, ces composés suscitent un intérêt croissant. Créés par les chimistes dans les années 1980, ces matériaux sont des organo-halogénures de plomb constitués de couches ultrafines inorganiques de PbI_3 séparées par des couches de molécules organiques, CH_3NH_3 , agencées selon le réseau cristallin de la pérovskite. Pour ces pérovskites hybrides, il reste un défi important à relever qui consiste à remplacer le plomb sans détériorer leurs performances. De nombreuses questions ouvertes sont étudiées, comme l'influence des propriétés structurales et de la dynamique de réseau sur les propriétés optiques et le transport électronique.

À l'interface avec la physico-chimie, l'étude des matériaux pour batteries est orientée vers la recherche d'une augmentation des performances. Elle concerne la recherche sur les matériaux constitutifs : électrodes, électrolytes, revêtements. Parmi les principales considérations, on compte la sécurité, la densité d'énergie, le coût, la stabilité cinétique et électrochimique, et la vitesse de recharge. La France compte parmi les pays moteurs dans ces recherches, grâce à d'excellents groupes de recherche à l'interface entre physique et chimie.

La compréhension des mécanismes de transfert d'énergie du solide au liquide est un des points clé d'une nouvelle approche pour moduler les échanges thermiques inter-faciaux. En effet, à l'interface liquide/solide, l'énergie du liquide est différente en raison du déséquilibre entre l'attraction intermoléculaire et celle de la surface. L'optimisation des échanges thermiques interfaciaux pourrait apporter des nouvelles solutions aux techniques classiques de production de froid comme l'expansion, la vaporisation du gaz, ou encore l'effet Peltier.

Enfin, les nanofils piézoélectriques semi-conducteurs (GaN et ZnO entre autres) pour la transduction d'énergie mécanique font actuellement l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales. Ces nanofils sont classiquement immergés dans une matrice diélectrique pour créer un composite qui peut être intégré dans des capteurs, actionneurs ou dispositifs de récupération d'énergie mécanique avec des applications potentielles dans des dispositifs autonomes en énergie, la surveillance des structures, l'internet des objets ou pour des dispositifs portables. D'un point de vue fondamental, il reste beaucoup d'inconnues sur les propriétés intrinsèques des matériaux piézoélectriques à l'échelle nanométrique, ainsi que sur leur comportement pour les grandes déformations, autorisées par leur flexibilité et leur compressibilité, ou sur leurs mécanismes de dégradation mécanique ou de rupture.

VI. Matière molle et matériaux.

La matière molle est un domaine de recherche intrinsèquement interdisciplinaire à la frontière avec les autres disciplines comme la mécanique de fluides, les sciences des matériaux ou la biophysique. Les colloïdes, les émulsions, les mousses, les polymères, les cristaux liquides et les milieux granulaires sont des exemples typiques de systèmes étudiés dans le domaine de la matière molle.

Ces matériaux sont souvent constitués d'unités élémentaires significativement plus grandes qu'un atome mais beaucoup plus petites que les dimensions globales du système. L'énergie d'interaction entre ces unités élémentaires est généralement de l'ordre de l'énergie thermique, donc les excitations thermiques sont souvent suffisantes pour réorganiser le système. Pour cette raison, ces matériaux ont généralement des modules d'élasticité faibles, ce qui les rend facilement déformables ("mous") et fortement réactifs à toute sollicitation externe. De plus, ces systèmes sont souvent entropiques, contrôlés par des phénomènes interfaciaux, dissipatifs, partiellement désordonnés, non linéaires et loin de l'équilibre, ce qui donne lieu à l'émergence de phénomènes complexes et de propriétés remarquables.

Les techniques de diffusion aux petits angles des rayons X, des neutrons et de la lumière sont idéales pour explorer ces structures qui s'étendent sur plusieurs échelles de distance. Les applications de la diffusion aux petits angles sont nombreuses en matière molle et en biologie structurale non cristalline. Les progrès récents en instrumentation permettent aux techniques de diffusion des rayons X et des neutrons d'atteindre des tailles allant jusqu'à la dizaine de micromètres, ce qui permet un recouvrement avec les techniques de diffusion de la lumière et d'imagerie. La réflectivité des rayons X et des neutrons analyse le profil de densité sous la surface tandis que la méthode d'incidence rasante analyse l'organisation structurale dans le plan de la surface. On développe actuellement des dispositifs instrumentaux qui combinent la diffusion aux petits angles à la diffusion (diffraction) aux grands angles qui permet d'analyser les structures au niveau atomique. La brillance toujours accrue des synchrotrons permet d'étudier des cinétiques jusqu'à une fraction de milliseconde tandis que la spectroscopie de corrélation de photon permet de descendre à la microseconde.

Les problèmes inhérents à la matière molle soulèvent des questions qui sont importantes dans divers domaines de la science. Par exemple, la biologie, la chimie, la géophysique, l'astrophysique, la physique des solides et la physique nucléaire sont toutes confrontées à des comportements hors équilibre (§VIII.4). De même, les problèmes liés au désordre apparaissent dans de nombreuses disciplines. Ces problématiques demandent des modes d'attaque multiples alliant physique statistique, optique, mécanique et hydrodynamique, physico-chimie et biochimie, etc. Par ailleurs, les applications sont multiples, en particulier dans le domaine des matériaux. Le développement de la matière active, le contrôle fin des propriétés macroscopiques par celui des briques élémentaires et la physico-chimie sont autant d'outils qui permettent d'imaginer les matériaux actifs, intelligents, stimulables qui seront développés dans le futur. Pour ces raisons, la matière molle est un domaine de recherche en pleine expansion, et de nouvelles interfaces avec d'autres disciplines sont constamment en train de se créer. La communauté française, qui s'est structurée au fil des années via de nombreux groupements de recherches (GDR), entre autres, est reconnue internationalement.

Dans ce paragraphe, nous mettons en lumière quatre thématiques aux enjeux majeurs pour la recherche dans le domaine des matériaux et de la matière molle.

1. Des atomes artificiels aux matériaux du futur

Ces vingt dernières années, les « métamatériaux » et les « matériaux stimulables » se sont fortement développés. La recherche interdisciplinaire sur ces nouveaux matériaux aborde certains des problèmes les plus passionnants aux interfaces de l'ingénierie des matériaux, de la physique de la matière molle, de la topologie, des nanosciences et de la photonique.

Métamatériaux

Les métamatériaux sont des matériaux constitués de particules « élémentaires », les super-atomes (particules, bulles, gouttes, grosses molécules...). Ils sont conçus dans le but d'obtenir des propriétés exotiques : bandes d'énergie interdites à certaines longueurs d'onde, indices de réfraction négatifs ou propriétés auxétiques, c'est-à-dire à coefficient de Poisson négatif. Ces propriétés résultent principalement de la manière dont les super-atomes sont assemblés et structurés. La conception intelligente de ces super-atomes et le contrôle de leur organisation dans l'espace sont essentiels pour façonner de nouveaux matériaux aux propriétés inédites. En alternative à l'approche « top-down », longue et coûteuse, de nombreuses stratégies d'autoassemblage thermique ou athermique de nanoparticules commencent à être explorées. Une compréhension globale de cet autoassemblage est primordiale dans de nombreuses applications nano et biotechnologiques. Une stratégie particulièrement prometteuse pour organiser les nanoparticules dans des réseaux cristallins à faible symétrie réside dans

l'utilisation des cristaux liquides comme milieu pour l'autoassemblage. Les nanoparticules solides perturbent localement l'alignement moléculaire du cristal liquide, donnant lieu à des distorsions multipolaires élastiques qui entraînent des interactions fortement anisotropes entre les particules, et peuvent conduire à un ordre local. De même, des réseaux de défauts topologiques dans les cristaux liquides peuvent être utilisés pour piéger des particules colloïdales dans des structures de grande complexité. Bien que la structure d'équilibre d'une grande variété de tels systèmes ait été largement étudiée, les voies cinétiques de l'autoassemblage posent encore de nombreuses questions. À titre d'exemples, citons les tensioactifs, les copolymères séquencés et les complexes lipide-biopolyélectrolytes (par exemple ADN, actine, etc.).

Les applications de ces nouveaux matériaux auront un fort impact sociétal. Dans le domaine des ondes électromagnétiques, ces applications incluent les lentilles super-résolues, les couches d'invisibilité ou les antennes à haute performance. Des applications prometteuses sont aussi envisagées dans le domaine des ondes mécaniques : les capes antisismiques, le camouflage acoustique ou les couches thermiques. Enfin, les études sur les métamatériaux thermiques, capables de contrôler activement le flux thermique, connaissent une croissance particulièrement importante, portée par l'expression des besoins en relation avec la transition énergétique.

Matériaux stimulables

Les matériaux stimulables intelligents sont des matériaux qui répondent de manière utile, fiable et reproductible à un stimulus physique, chimique ou biologique (température, lumière, pH, champ magnétique, etc.). Un défi important dans le développement de ces matériaux est d'augmenter leur sensibilité : une petite variation du stimulus doit provoquer une réponse importante du matériau. Les systèmes complexes⁹ sont des candidats parfaits pour de tels matériaux en raison de leur sensibilité aux conditions environnementales, des réponses associées et des échelles de temps et d'énergie mises en jeu.

À long terme, les domaines des métamatériaux et des matériaux stimulables devraient fusionner partiellement dans le but de fournir des métamatériaux stimulables capables d'ajuster leurs propriétés à un contexte donné. De plus, on peut anticiper que les super-atomes de ces matériaux auront progressivement un caractère actif, comme décrit au § VI.3. Les « métamatériaux actifs intelligents » peuvent constituer des objets importants pour une compréhension et une conception améliorée de la « matière vivante », avec des applications potentielles en robotique.

2. Nanofluidique et interfaces

Là où la microfluidique a ouvert des perspectives de nature technologique, mais avec une physique "standard", la nanofluidique ouvre à la fois la porte à une nouvelle physique, à une échelle où les lois de l'hydrodynamique ne s'appliquent plus, ainsi qu'à des applications à fort impact sociétal (énergie « bleue » ou énergie osmotique, désalinisation, purification de l'eau, diagnostic médical...). Les fluides nanoconfinés sont considérés comme des systèmes intrinsèquement nouveaux, ce qu'illustrent les termes de sur-solubilité, de super-permittivité ou de super-lubrification introduits pour décrire leurs propriétés. De nouveaux phénomènes caractéristiques du régime moléculaire, comme le blocage de Coulomb ionique, pourraient permettre de développer des dispositifs aux réponses non linéaires complexes comparables à celles de leurs analogues électriques ou biologiques (par exemple canaux

⁹ Ce sont des systèmes ouverts dont les différentes composantes sont en interaction, souvent non-linéaire, entre elles et avec l'extérieur, ce qui les rend intrinsèquement difficiles à modéliser. En matière molle, ce sont souvent les interactions entre des éléments à des échelles très différentes qui rendent les systèmes complexes.

transmembranaires). La nanofluidique intéresse ainsi les domaines de la physique, de la biologie, de la chimie et le développement d'interactions interdisciplinaires y est donc fondamental.

Des confinements à l'échelle de la centaine de nanomètres et jusqu'au nanomètre peuvent être atteints au sein de nanotubes de carbone, d'empilements de feuillets d'oxyde de graphène, dans des films de savon, dans des nanopores ou nanocanaux artificiels fabriqués grâce à des technologies de salle blanche, sur biopuces, etc. À ces échelles, les interfaces jouent un rôle majeur et ne peuvent plus être décrites comme des discontinuités. En particulier, la portée des forces est comparable aux échelles de confinement. C'est une des raisons pour lesquelles l'un des champs actuels concerne l'influence des charges en nanofluidique, en particulier sur la friction. C'est un élément clé pour les dispositifs de stockage ou conversion d'énergie. Une meilleure compréhension des propriétés de nanorhéologie et de structuration des liquides ioniques en fonction des propriétés de surface doit être développée. De plus, la compréhension de leurs propriétés électrocinétiques est un véritable défi, avec par exemple de nombreuses questions ouvertes sur la dynamique de la charge et de la relaxation à double couche.

À l'interface entre physique et chimie, la compréhension des interactions solide/liquide (friction, écoulement...) ainsi que la maîtrise des interactions spécifiques dues aux différents types d'interfaces solide/liquide sont des objectifs majeurs qui seront atteints grâce, entre autres, à un meilleur contrôle et une meilleure caractérisation des fonctions chimiques sur les parois et aux extrémités des nanocanaux. Des progrès sont attendus dans le contrôle des conditions de surface grâce aux outils biologiques par exemple.

Parmi les développements futurs, on peut également citer ceux qui exploitent le fait que de très petites forces puissent devenir importantes aux petites échelles, ce qui permet d'observer des effets élasto-capillaires, ouvrant des perspectives en termes de dispositifs de forme contrôlable via un paramètre extérieur (température, hygrométrie, champ électrique, microgravité...).

Enfin, la nanofluidique va au-delà des interfaces solide/liquide. La problématique du contrôle de l'organisation ou du transport d'« objets » aux interfaces fluides, de la stabilisation de mousses ou d'émulsions, ou du transport de gouttes/bulles est également en développement. Le transport induit par la surface dans les mousses, par la lumière, la température ou les stimuli électriques, ouvre des perspectives pour leur contrôle et leur traitement à un moment où elles apparaissent comme des matériaux prometteurs dans de nombreux contextes comme la décontamination nucléaire ou la dépollution.

Malgré l'utilisation avec succès de techniques sensibles aux échelles nanométriques (vélocimétrie, machine à force de surface...), il subsiste un certain nombre de défis en termes d'instrumentation aux limites, comme l'amélioration des résolutions spatiales et temporelles des techniques électriques, optiques ou de microscopies en champ proche utilisées pour caractériser les écoulements. L'utilisation de techniques d'analyse globale (diffusion des rayons X, diffusion de neutrons, RMN...) s'avère complémentaire et nécessaire car elle permet des études fines, *in situ*, des propriétés des nanofluides. Pour les applications, un point de blocage actuel est la réalisation, de manière reproductible, de membranes de grande taille à base de nanocanaux, par exemple avec les nanotubes de carbone. De manière générale, la voie de l'autoassemblage semble à privilégier pour une fabrication à grande échelle et à moindre coût. Une autre piste récente est la fabrication de circuits nanofluidiques par empilement de feuillets 2D, qui pourrait être à l'origine d'une révolution nanofluidique comparable à celle qu'a connue la microélectronique avec l'avènement des circuits imprimés.

3. De la biophysique à la matière active

L'objet vivant est composé d'un grand nombre d'entités qui forment un système thermodynamique hors équilibre. Ce système interagit avec son environnement par des échanges de matière et d'énergie. Il possède différents niveaux d'organisation et se modifie en fonction des interactions externes et des décisions internes. La modélisation du vivant doit tenir compte de ces processus, ainsi que de l'irréversibilité et de l'instabilité des phénomènes biologiques qui le constituent. C'est un aspect fondamental pour la réalisation de systèmes complexes doués de fonctions autonomes.

La diffusion des rayons X ou des neutrons fournit des informations structurales physiologiquement pertinentes pour des systèmes biologiques, par exemple le muscle ou les membranes excitables où une compréhension de la structure et de la fonction mécanique au niveau moléculaire peut être obtenue. On peut aussi citer les interactions protéine-protéine, le repliement et les conditions d'autoassemblage et de cristallisation des protéines.

Les systèmes biologiques ont inspiré une nouvelle discipline que l'on appelle la matière active et qui est à la frontière entre la biophysique, la matière molle et la physique statistique. Elle concerne des assemblées dont les unités élémentaires sont « actives », c'est-à-dire qu'elles consomment de l'énergie pour produire du travail (mouvement). On y trouve des collectifs d'objets biologiques comme les oiseaux, les microbes ou les suspensions bactériennes, mais aussi de la matière non vivante qui peut, par exemple, s'autopropulser par le biais d'une réaction chimique comme c'est le cas pour des gouttes autopropulsées. Ces systèmes sont hors équilibre et ce qui les rend extrêmement intéressants d'un point de vue théorique est le fait qu'ils n'admettent aucune description thermodynamique immédiate. Les théories hydrodynamiques de la matière active ont été très largement développées et prédisent certains comportements universels tels que la propagation d'ondes, les fluctuations géantes ou les transitions de phase. Beaucoup de ces effets ont été observés de manière qualitative dans de nombreux systèmes, mais malgré les progrès récents, peu de systèmes expérimentaux modèles sont assez bien contrôlés pour permettre de tester quantitativement la théorie.

Les réseaux constituent une autre approche fructueuse pour l'analyse des populations avec un grand nombre d'éléments comme les gènes et les neurones. L'approche mathématique est particulièrement pertinente avec l'élaboration de techniques de codage (génomique) et d'analyse probabiliste (neurones). Les modèles ainsi créés sont développés grâce à des méthodologies statistiques couplées au traitement de l'information à partir de bases de données toujours plus volumineuses. L'acquisition, l'élaboration et ensuite l'exploitation de ces données conjuguent les performances technologiques associées à des moyens de calcul très puissants avec l'informatique théorique et ses nouveaux développements en termes d'intelligence artificielle et d'apprentissage profond (« deep learning »). D'ailleurs, l'apprentissage profond est également inspiré par la biologie du cerveau et le développement des neurosciences qui permettent la conception de nouvelles architectures de réseaux de neurones et d'apprentissage machine, discuté au paragraphe VIII.2.

VII. Instrumentation aux limites ultimes et TGIR

L'instrumentation, à la base de toute recherche expérimentale, est essentiellement de nature physique. Les progrès sont constants et de nouveaux développements sont attendus. Chaque fois que l'instrument ou la métrologie gagne un facteur 10 (ou 100) une nouvelle science est faite ou de nouvelles technologies sont réalisables. On peut distinguer trois niveaux : la métrologie, les techniques de laboratoire et les très grandes infrastructures de recherche (TGIR).

Dans le domaine de la métrologie, les progrès récemment accomplis ont permis de décider lors d'une session historique de la Conférence Internationale des Poids et Mesures en

novembre 2018 la redéfinition de quatre des sept unités du système international (kg, A, K, mol) maintenant déterminées à partir de constantes fondamentales, comme c'était déjà le cas pour le mètre avec la vitesse de la lumière. Il s'agit de la constante de Planck pour le kilogramme, de la charge de l'électron pour l'ampère, de la constante de Boltzmann pour le kelvin et du nombre d'Avogadro pour la mole. Cela permet de ramener les mesures de longueur, d'intensité électrique, de masse et de température à des mesures de fréquences, la grandeur physique mesurée avec la plus grande précision. Toutes les sciences en bénéficient.

S'agissant des TGIR gérés par l'INP, en plus de sources nationales (SOLEIL et ORPHEE), la France héberge (à Grenoble) deux TGIR européens majeurs : l'ESRF, synchrotron de troisième génération, qui va bénéficier en 2019 d'une mise à niveau importante, et l'Institut Laue-Langevin (ILL), source continue de neutrons à haut flux, inégalée, et dont le programme « Endurance » (2016-2023) offrira de nouvelles possibilités dans les domaines de la science des matériaux, du magnétisme, de la matière molle, de la biologie et de la physique des particules.

S'agissant des techniques de laboratoire, nous avons choisi d'en illustrer ici les progrès sur l'exemple de la microscopie.

1. Métrologie

En ce qui concerne la métrologie du temps et des fréquences et les mesures de précision qu'elle permet, la France a joué un rôle moteur dans les développements instrumentaux (toujours en cours) qui ouvrent l'accès à une sensibilité accrue. On peut citer le refroidissement toujours plus poussé et le piégeage d'atomes, maintenant étendu aux molécules, grâce aux techniques combinées de la cryogénie et du refroidissement laser, ainsi que l'amélioration des horloges atomiques au niveau de 10^{-18} . Après la redéfinition du kilogramme décidée cette année 2018 et à laquelle a contribué l'expérience française de balance du Watt qui allie expertise en métrologie électrique et en interférométrie atomique, une redéfinition de la seconde est envisagée à l'horizon 2026 à partir de la spectroscopie de l'atome de strontium.

Un autre développement spectaculaire concerne la distribution, à l'échelle européenne, de références de fréquences ultrastables par lien optique fibré, mise à disposition de laboratoires utilisateurs pour leurs propres mesures de précision. Elle a déjà conduit à un test de la relativité restreinte à partir d'horloges optiques mises en réseau de cette manière. Dans ce contexte, les peignes de fréquence ont joué un rôle crucial, pour la comparaison de fréquences très différentes (des fréquences optiques aux radiofréquences) ou la stabilisation de n'importe quelle fréquence sur une référence fournie par un laboratoire de métrologie via le réseau fibré.

À l'instar des développements pour le spatial, certains des développements instrumentaux en métrologie ont un potentiel de valorisation important (lasers stabilisés, électronique, capteurs inertiels de terrain...). Le développement français d'un réseau fibré de références de fréquence métrologique a par exemple donné lieu à des transferts technologiques vers des petites et moyennes entreprises. Dans ce contexte, maintenir ou augmenter le potentiel technique dans les laboratoires par le recrutement d'ingénieurs de recherche est crucial. Cela faciliterait notamment la participation de laboratoires français à des programmes spatiaux internationaux.

Soulignons que pour ces projets à long terme (développements sur plus de dix ans), le financement par projet ANR est inapproprié.

2. Les très grandes infrastructures de recherche

Dans ce domaine, la France occupe une position exceptionnelle.

Synchrotrons

Les synchrotrons, sources très intenses de rayons X, jouent un rôle essentiel en sciences dans des domaines aussi variés que la physique de la matière condensée, la chimie, les sciences de la terre et de l'univers, la biologie structurale, les études du patrimoine et la médecine. Avec les progrès instrumentaux poussant les techniques à leurs limites, il est possible d'explorer la matière dans des conditions de plus en plus extrêmes. Avec son flux fortement augmenté dès 2020, l'ESRF, permettra, entre autres, de relever de nouveaux défis dans trois grandes classes d'expériences sous conditions extrêmes : hautes pressions, hautes températures et champs magnétiques intenses.

Le multimégabar devient accessible avec des enclumes en diamant et les progrès des fours permettent de s'approcher des conditions du centre de la terre. La brillance accrue de l'ESRF permettra l'imagerie, la diffraction et la spectroscopie jusqu'à l'échelle de temps d'un seul flash (bunch) en magnétisme sous un champ allant jusque 100 teslas.

La France possède une source nationale très performante, SOLEIL sur le plateau de Saclay. SOLEIL propose un ensemble complet de techniques de diffraction, d'imagerie et de spectroscopies à des fréquences allant typiquement du THz à celles des rayons X durs. Un programme est mis en place pour augmenter encore le flux cohérent de photons et améliorer la focalisation. L'objectif est d'atteindre une résolution nanométrique à trois dimensions à l'aide de plusieurs sondes et de disposer de spectroscopies complémentaires. Ceci requiert une maîtrise de l'instrumentation aux limites qui se fera en interaction avec les réseaux de plateformes nationales (IR-RMN, METSA, etc.), les infrastructures lasers (ATTOLAB, CLIO, ...) et les centres de calculs nationaux, ainsi qu'en coordination au niveau européen avec la LEAPS (League of Electron Accelerator based Photon Sources).

L'environnement est très compétitif avec la mise en service de lasers à électrons libres (XFEL à Hambourg, LCLS à Stanford, SACLA au Japon et SwissFEL près de Zürich qui produisent des impulsions très brèves ~ 10 fs et très intenses, pour des études de cinétiques par exemple).

Neutrons

Les grands instruments utilisant la diffusion neutronique constituent une approche unique pour l'étude de la structure et de la dynamique des matériaux, du magnétisme, de la matière molle, et de la biologie². La diffusion des neutrons apporte des informations indispensables, complémentaires à celles obtenues avec d'autres méthodes comme la diffusion des rayons X, la microscopie électronique, la RMN, etc. On peut aussi noter que les faisceaux de neutrons sont utilisés en physique fondamentale.

Les techniques d'analyse des matériaux par les neutrons sont multiples.

- La diffraction (ou diffusion aux grands angles) pour l'étude des matériaux ; elle est indispensable pour l'étude des matériaux magnétiques et pour les éléments légers, en particulier l'hydrogène.
- La diffusion aux petits angles pour étudier les structures de grandes tailles, la matière molle, mais aussi la physico-chimie avec des applications croissantes pour le magnétisme.
- La réflectivité neutronique qui permet l'étude du profil des surfaces
- La spectroscopie neutronique avec les spectromètres en temps de vol et à trois axes pour mesurer les énergies des excitations, incluant éventuellement l'utilisation de la polarisation des neutrons pour l'étude des excitations magnétiques. Les techniques d'écho de spin permettent d'analyser des énergies de l'ordre du micro-eV et, combinées à celles du temps de vol, d'étudier, par exemple, les phénomènes de diffusion atomique entre quelques picosecondes et une centaine de nanosecondes. Dans de nombreux systèmes, plusieurs

degrés de liberté sont souvent couplés (positions atomiques, spin, etc.) et l'étude de la dynamique de réseau par les phonons permet de mieux appréhender ces effets de couplage, par exemple le couplage électron-phonon dans les matériaux supraconducteurs ou le couplage spin-phonon dans les multiferroïques. Par ailleurs, les propriétés dynamiques jouent un rôle central pour la compréhension et l'amélioration des matériaux liés au développement des énergies alternatives, par exemple dans les matériaux thermoélectriques, comme les clathrates ou les matériaux photovoltaïques, comme les pérovskites hybrides.

- L'imagerie avec les neutrons se développe avec des progrès en termes de résolution spatiale et de temps d'acquisition. Elle est utilisée pour des études de type R&D, pour l'étude du patrimoine, en géologie, en biologie végétale, etc.

Au niveau des études multiéchelles, les différentes techniques neutrons offrent une extension exceptionnelle de cinq ordres de grandeur sur les distances et huit en temps/énergie.

La France héberge l'ILL et le réacteur français Orphée de Saclay (en fonctionnement jusqu'en 2019 seulement²) et elle participe actuellement à hauteur de 8% à la future source européenne de neutrons ESS (European Spallation Source) à Lund, en Suède. La France dispose d'un très grand nombre de chercheurs utilisant la diffusion des neutrons (environ 1700). Il est fondamental que l'ILL soit maintenu en fonctionnement sur les 15 prochaines années et au-delà.

Un projet de source compacte de neutrons à haute brillance est développé à Saclay. Il s'agit d'une technologie innovante, non encore validée, qui pourrait couvrir une partie des besoins de la communauté française en diffusion de neutrons (grands et petits angles), imagerie et réflectométrie suite à la fermeture d'Orphée. Le conseil scientifique souligne l'intérêt d'un projet de source compacte, qui s'inscrit dans une évolution des sources pour la diffusion neutronique au niveau européen comme au niveau mondial.

La création de la fédération française de la neutronique en 2017 apparaît comme un élément important pour fédérer les neutroniciens du Laboratoire Léon Brillouin qui utilisent le réacteur Orphée et ceux qui travaillent sur les lignes CRG (pour « Collaborative Research Group ») à l'ILL. Nous recommandons la création d'une Unité Mixte de Recherche CEA-CNRS multisite pour une meilleure mutualisation des moyens financiers et humains et de gagner en visibilité.

Les recommandations ci-dessus nous semblent importantes pour que la communauté française des neutroniciens puisse bénéficier pleinement de l'investissement dans ESS.

Champs intenses

Si des champs magnétiques de dix à vingt de tesla (T) sur une zone de 30 à 50 mm peuvent être fournis par une bobine supraconductrice d'un coût modéré, des champs plus intenses (jusqu'à 100 T) ne peuvent être produits que dans des grandes installations nationales, voire européennes comme le laboratoire européen des champs magnétiques intenses (EMFL) qui regroupe quatre sites (Grenoble, Toulouse, Nimègue et Dresde). Des champs pulsés de 200 T sont obtenus à Toulouse mais avec des bobines qui se détruisent à chaque fois.

Des besoins en champs magnétiques intenses existent et l'utilisation de champs intenses a conduit à des percées remarquables comme la découverte de l'effet Hall quantique (prix Nobel de Von Klitzing en 1980). Aujourd'hui, l'exploration des nouveaux états de la matière en champ intense est un sujet toujours très actif dans les matériaux à corrélations électroniques fortes. Les matériaux 2D (graphène, dichalcogénures, etc.) ou les isolants topologiques constituent aussi un domaine où les études en champs intenses sont importantes. L'étude des matériaux magnétiques au sens large (multiferroïques, skyrmions, magnétocaloriques, etc.), comme les

matériaux supraconducteurs, requiert de manière récurrente l'utilisation de champs magnétiques intenses.

Enfin, il y a la magnétoscience, fabrication de matériaux sous champ magnétique, la magnétohydrodynamique, plateforme de lévitation, où le champ magnétique n'est pas si intense mais où la taille de la zone expérimentale est grande, nécessitant de grosses installations.

La feuille de route européenne prévoit la jouvence des installations de Grenoble et de Toulouse (déjà en partie réalisée) et l'installation dès 2019 de deux bobines hybrides, l'une à Grenoble et l'autre à Nimègue aux Pays-Bas. L'installation d'une bobine supraconductrice à Grenoble a permis très récemment l'obtention d'un insert supraconducteur à haute température critique dans un champ extérieur de 10 T qui sera porté à 20 T dans un avenir assez proche. L'étape suivante pour les années 2030 pourrait être un hybride 60 T européen.

3. Progrès récents en microscopie électronique et de sonde atomique

La microscopie électronique en transmission a connu des modifications profondes au cours des quinze dernières années, avec une accélération marquée dans les toutes dernières années.

La correction d'aberration sphérique au début des années 2000 est maintenant accessible assez couramment. Elle a permis d'importants progrès dans la compréhension des matériaux, non seulement grâce à une résolution spatiale accrue, mais également avec la possibilité de cartographier colonne atomique par colonne atomique les propriétés chimiques et électroniques de matériaux grâce aux spectroscopies de type electron energy loss spectroscopy (EELS) ou electron dispersive spectroscopy (EDS). Cette avancée a eu un impact majeur en chimie et physique des matériaux, des matériaux de van der Waals aux oxydes fonctionnels.

De plus, depuis quelques années, des progrès spectaculaires dans le domaine de la monochromation (avec des résolutions spectrales meilleures que 5 meV) et les théories afférentes ont permis de cartographier des excitations de basse énergie d'abord dans le visible (plasmons) puis dans l'infra-rouge moyen (phonons) avec des résolutions spatiales nanométriques, faisant rentrer de plain-pied la microscopie électronique dans les domaines de la nanooptique et nanophononique.

En parallèle, l'introduction de canons pulsés, bien qu'encore rare, rend possible l'étude des matériaux avec une résolution nanométrique, voire atomique, et à des échelles de temps de la picoseconde, ouvrant de nouveaux champs d'étude de l'interaction électrons/matière/photons. De nombreux développements dans le domaine de la diffraction et de l'imagerie diffractive et assimilée (ptychographie, imagerie de phase différentielle, holographie de champ sombre), alimentés entre autres par l'amélioration des détecteurs d'électrons, ont déjà des applications en physique des matériaux (mesures de contraintes à très haute résolution) ou en cristallographie d'objets fragiles.

Finalement, le domaine de la microscopie *in situ*, où l'échantillon est soumis à une sollicitation physique (électrique, optique...) et/ou placé dans un environnement contrôlé (gaz, liquide, température) se popularise et ouvre de nouveaux champs d'étude, des transitions de phase à la croissance en phase liquide, en passant par l'étude des réactions catalytiques à l'échelle de la particule unique.

La sonde atomique tomographique occupe une place singulière, en complément de la microscopie électronique. C'est un microscope analytique tridimensionnel de haute résolution. Une innovation majeure a été opérée au milieu des années 2000 avec l'adaptation d'un laser

femtoseconde permettant l'analyse des matériaux peu conducteurs comme les semi-conducteurs (seuls les matériaux conducteurs pouvaient être analysés auparavant). On peut citer par exemple la reconstruction 3D d'un transistor MOSFET (pour Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ou de nanofils semiconducteurs montrant la distribution spatiale des dopants, la mise en évidence de ségrégations interfaciales modifiant les performances de cellules photovoltaïques ou de verres ou enfin l'étude de multi-puits quantiques comportant des nan-hétérogénéités chimiques modifiant les propriétés de photoluminescence. Un défi instrumental majeur pour le futur est l'intégration d'une sonde atomique tomographie dans un microscope électronique à transmission pour en faire un seul instrument destiné à des applications allant de la métallurgie physique aux nanosciences (cf §V.2).

L'un des principaux problèmes de la microscopie électronique et de la sonde atomique est le coût des appareils et de leur maintenance. La maintenance peut difficilement être financée par une équipe et représente une charge très importante à l'échelle d'un laboratoire.

La communauté des microscopistes organise l'accès aux appareils haut de gamme via le réseau METSA. L'augmentation du soutien financier au réseau METSA permettrait d'augmenter le taux de projets acceptés, au bénéfice de l'ensemble de la communauté des utilisateurs.

VIII. Aspects transverses

Dans ce paragraphe intitulé « aspects transverses », nous mettons en perspective quelques-unes des thématiques intersections ou plus largement interdisciplinaires.

1. Vers l'hybridation des domaines de recherche en physique quantique

Les différents sous-domaines où la physique quantique est centrale ont vu leurs interactions se renforcer notablement ces dernières années, avec l'établissement d'un langage commun entre physiciens issus de différentes communautés. Le passage de l'un à l'autre de ces domaines ne concerne plus seulement les théoriciens, mais également les expérimentateurs. On voit par exemple des chercheurs s'intéresser aux qubits supraconducteurs ou aux polaritons de cavité après avoir été formés sur les atomes ultra-froids. Les concepts et les outils issus d'une discipline diffusent dans les autres, et cela facilite l'émergence de systèmes hybrides. On peut citer l'exemple des systèmes topologiques, des systèmes corrélés, désordonnés ou chaotiques, des systèmes quantiques ouverts hors équilibre, de la décohérence... La limitation ou la maîtrise de la décohérence est d'ailleurs un enjeu majeur pour les applications au calcul et à la transmission de l'information quantique (intrication) au travers des systèmes complexes. La dynamique de quelques spins en interaction est bien comprise, mais ce n'est pas le cas pour un grand ensemble de particules fortement intriquées ou pour des variables continues, une alternative prometteuse aux qubits pour transporter l'information quantique.

Dans le domaine des capteurs, la physique quantique joue également un rôle majeur, étant donné la grande sensibilité des systèmes quantiques, qui pourra encore être améliorée par l'utilisation d'états quantiques comprimés : détection de champs magnétiques très faibles, interféromètres atomiques, nanorésonateurs se comportant comme un oscillateur mécanique quantique... Ce dernier dispositif correspond à la naissance du nouveau domaine de l'optomécanique quantique il y a une dizaine d'années, où la France joue un rôle moteur. À la frontière des mondes classiques et quantiques, ce domaine ouvre la voie à l'amélioration des capteurs et au développement de systèmes hybrides couplant optique, mécanique et nanocircuits électroniques.

Avec le lancement officiel du Flagship « Quantum Technologies » en 2016, l'Europe a récemment rejoint les efforts engagés par les États-Unis et la Chine depuis une dizaine d'années vers les applications de la physique quantique aux communications, au calcul, aux capteurs et à la simulation. La France est très bien placée dans plusieurs des axes thématiques concernés par ce Flagship. Il est important d'accompagner l'avancée des recherches dans ce domaine par une coordination de l'effort français au niveau national (CNRS, ministère de la recherche, CEA, industrie...) et un soutien appuyé à la recherche fondamentale où la compétition est particulièrement importante.

2. Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA), ou apprentissage automatique, s'appuie sur les algorithmes et sur les architectures matérielles classiques de traitement de l'information. Après une période d'optimisme dans les années 1960, on assiste à une traversée du désert puis à des progrès impressionnants ces dix dernières années. Ils sont basés à la fois sur le développement des algorithmes de réseaux dits « profonds » (jusqu'à des centaines de couches de neurones) et des cartes graphiques pour les faire fonctionner. Ces évolutions, qui permettent en particulier un traitement de données massives (« big data »), sont exploitées dans les domaines de l'astrophysique et de la cosmologie, par exemple. Cette stratégie "algorithmique" modélisant le comportement de réseaux de neurones (approche "Software Neural Network") avec des processeurs conventionnels présente une certaine efficacité, mais les ordinateurs actuels peinent à faire fonctionner des algorithmes de quelques millions de neurones, avec une lenteur et une consommation électrique considérables alors que le cerveau humain ne consomme que 25 watts. Il est désormais clair qu'ils ne seront pas capables de simuler des réseaux avec plusieurs centaines de millions de neurones.

L'intelligence artificielle à base de « Hardware Neural Networks » est un domaine de recherche émergent qui cherche à pallier ces limitations. Des nanocomposants pour imiter synapses et neurones ont ainsi été réalisés ces dernières années. Les recherches actuelles visent d'une part à conférer des propriétés supplémentaires inspirées du cerveau à ces composants multifonctionnels, et d'autre part à passer du composant au petit système de calcul. Les classes de matériaux les plus étudiées sont les oxydes, les matériaux à changement de phases, les matériaux bidimensionnels, les matériaux supraconducteurs et ceux du domaine de la spintronique. De nombreux travaux sont aussi menés à partir de technologies photoniques, ce qui permet de bénéficier des performances des technologies des télécommunications. Le champ de recherche de la « photonique neuromorphique » a émergé aux États-Unis et en Europe, impliquant plusieurs groupes de recherche en France. Le but est de réaliser un traitement photonique de l'information par la mise en œuvre de paradigmes de calcul neuro-morphiques ou de dispositifs neuromimétiques.

Les nanocomposants organiques pour l'électronique neuromorphique et l'interface avec le vivant sont une autre piste de recherche. Y est associé le développement d'algorithmes adaptés aux nouveaux composants neuromorphiques et capables d'en exploiter les propriétés spécifiques, ainsi que d'en tolérer les imperfections. Les concepts de systèmes dynamiques non linéaires, d'organisation de la complexité et de compréhension physique de la notion d'information devraient jouer un rôle clé dans l'étude des mécanismes fondamentaux du calcul neuromorphique. Les interfaces avec la matière active et les neurosciences vont se développer, accompagnés d'une réflexion théorique sur la manière dont les systèmes calculent grâce à des effets physiques (minimisation d'énergie, entropie, dynamique non linéaire, etc.).

Un des grands défis, aussi bien du côté algorithmique que matériel, est l'apprentissage non supervisé, ne nécessitant que peu de données et évolutif au cours du temps. Dans ce contexte, des puces IA hybrides nanocomposants/CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) autonomes, capables d'accélérer la reconnaissance de motifs, devraient voir

le jour dans les années qui viennent. La progression vers des réseaux complexes, comme l'exploration empirique des systèmes neuronaux du vivant avec une ambition spécifique concernant la mesure et l'analyse de ces systèmes, nécessitera le développement d'outils de caractérisation et de simulation spécifiques.

La France est en pointe dans ce domaine de recherche fondamentale à l'interface physique / nanocomposants / IA. Il faudra veiller à ce qu'elle ne perde pas son avance lorsqu'il s'agira de passer au système (notamment à cause du déclin européen de l'industrie des semi-conducteurs). Le CNRS peut agir en ce sens en soutenant la science des (nano-)matériaux et en inscrivant la thématique « matériaux pour l'IA » au cœur de la construction des instituts d'IA. Ces derniers sont pour l'instant surtout focalisés sur l'algorithmie et la science des données. Pourtant, encore une fois, l'IA du futur ne fonctionnera pas sur la base de l'électronique actuelle et la compréhension des systèmes neuromorphiques met en jeu, entre autres, des concepts physiques tels que le memristor (le memristor est une résistance électrique dont la valeur évolue en fonction de son histoire électrique). Ces recherches sont de plus totalement en phase avec l'IA verte préconisée par le rapport Villani. L'interdisciplinarité est intrinsèque à cette thématique. Au-delà d'actions d'animation telles que le GDR BioComp, ces domaines de recherche doivent fortement être soutenus (projets collaboratifs, laboratoires communs...).

3. Phénomènes multiéchelles

Les phénomènes multiéchelles constituent un thème transversal que l'on retrouve dans presque tous les domaines de la physique et aux interfaces avec la biologie, la géologie ou la chimie par exemple. Les propriétés des objets concernés dépendent de phénomènes physiques ou chimiques à plusieurs échelles spatiales et/ou temporelles. La manière dont les différentes échelles sont connectées est généralement complexe, loin des modèles simples supposant soit une invariance d'échelle soit une « séparabilité » d'échelle.

Un premier exemple de systèmes multiéchelles est celui d'ensembles d'objets identiques dans lequel un jeu d'interactions locales simples aboutit à des comportements collectifs hiérarchisés complexes (qui peuvent générer une rétroaction à l'échelle locale : on perd alors la hiérarchie des causes allant du local au global). « More is different » ! Un autre exemple est celui des matériaux caractérisés par une structure hiérarchique pouvant aller du nanomètre jusqu'à l'échelle macroscopique.

Pour fixer les idées, citons ici quelques systèmes et domaines où les phénomènes multiéchelles sont prépondérants et qui sont activement étudiés. Certains d'entre eux ont déjà été abordés dans les paragraphes précédents.

- La matière active : assemblées de bactéries, d'oiseaux, de poissons, de particules Janus ou de colloïdes synthétiques actifs. Comment ces systèmes s'auto-organisent-ils à différentes échelles au fil du temps ?
- Les géomatériaux tels que les sols, les sédiments argileux, les réservoirs carbonatés et/ou calcaires, présentent une organisation complexe et hiérarchique. La compréhension fine de ces matériaux et de leur évolution à court ou long terme requiert une analyse multiéchelle de leurs propriétés géométriques et des processus dynamiques d'adsorption ou de transfert d'eau ou d'autres éléments associés (la problématique du stockage d'éléments radioactifs en est un exemple essentiel).
- La compréhension des états électroniques excités en planétologie et en astrophysique nécessite le développement d'approches multiéchelles en temps.
- La nanofluidique, avec des visées applicatives pour l'énergie osmotique par exemple. La compréhension des propriétés des fluides nanoconfinés met en effet en jeu des échelles de temps extrêmement différentes, de la dynamique locale des atomes ou des molécules à leur transport à l'échelle macroscopique.

- La plasticité et la fracture dans un solide impliquent différentes échelles de temps et de longueur (ruptures de liens interatomiques, dynamique de dislocations, etc.) et intéressent de près les industriels.
- La physique des plasmas et donc la production d'énergie par fusion nucléaire. Comment relier le comportement microscopique du plasma à son comportement macroscopique ?

Le couplage accru entre méthodes expérimentales donnant accès aux différentes échelles de temps ou dans l'espace et le développement de méthodes donnant accès à de nouvelles informations (expériences attosecondes, nanoimagerie tridimensionnelle) sont indispensables et doivent être soutenus par l'INP.

L'intelligence artificielle (apprentissage automatique), déjà utilisée pour certains programmes de simulation multiéchelles, jouera à n'en pas douter un rôle primordial dans l'avenir. Ainsi, des banques de données peuvent être directement intégrées dans un code de calcul et mises à jour automatiquement lorsqu'une nouvelle configuration se présente. Ces développements devront s'accompagner d'une réflexion sur la production, le traitement, la mise à disposition et l'intégration de très grands volumes de données en collaboration avec la communauté des mathématiques appliquées.

Il nous semble enfin important d'accompagner le développement d'outils théoriques de la physique statistique permettant de maîtriser le changement d'échelle de type «bottom-up», au-delà du simple passage de grandeurs paramétrant l'échelle immédiatement supérieure. En suivant cette voie, les méthodes multiéchelles devraient en principe pouvoir être étendues à tous leurs champs d'application, en physique, chimie, biologie, géologie, sciences sociales, etc.

4. Phénomènes hors d'équilibre

Les phénomènes hors d'équilibre concernent des domaines extrêmement variés en physique, géologie, biologie, chimie, etc., et constituent un champ de recherche toujours très actif.

Un système en contact avec des réservoirs à des températures ou des potentiels différents n'est plus régi par les lois de la physique statistique d'équilibre. Un équivalent de la loi de Boltzmann pour les systèmes hors équilibre n'existe pas encore, mais des progrès importants ont été accomplis récemment pour décrire les fluctuations hors équilibre notamment pour les processus markoviens. Une théorie complète des processus irréversibles, qui relierait l'analyse probabiliste microscopique à l'approche phénoménologique, reste à élaborer.

L'état vitreux est un exemple de système hors équilibre qui défie les concepts de la physique ordinaire. Les verres, étudiés depuis de nombreuses années, sont des solides amorphes qui présentent un paysage énergétique complexe. La problématique se retrouve en cosmologie, en géologie ou en chimie. Le traitement de nombreux minima d'énergie s'est révélé être un des problèmes centraux de la physique statistique et nécessite l'invention d'un nouvel ensemble d'outils et de concepts.

Les systèmes hors équilibre possèdent des propriétés uniques qui restent à explorer. Par exemple, une propriété caractéristique des systèmes hors équilibre est leur capacité à stocker de la mémoire sur la façon dont ils ont été formés. Le processus d'atteinte de l'équilibre efface toute mémoire alors qu'un système qui n'a pas complètement relaxé conserve des souvenirs de sa création. Mais la rétention de mémoire et la perte de mémoire ne sont pas des processus simples - ils semblent pouvoir être atteints d'innombrables manières. Qu'est-ce que la formation de la mémoire ? Qu'est-ce qui rend différents types de souvenirs équivalents ? Une étude de ces questions peut être un moyen de comprendre la nature du monde hors équilibre.

Un autre exemple qui montre la richesse des phénomènes hors d'équilibre se trouve dans les phénomènes de structuration (« patterning »), qui émergent lorsqu'un système est amené dans un état instable dans lequel de petites perturbations évoluent pour créer des structures à grande échelle. Les détails de son évolution peuvent varier considérablement. Ils dépendent des symétries intrinsèques du système ou des conditions de croissance fixées par l'environnement ; le résultat est une variété de motifs qui diffèrent dans leur organisation et leurs échelles de taille. Comprendre comment un système sélectionne spontanément sa structure globale lorsqu'il est amené hors de l'équilibre reste un défi scientifique majeur.

IX. Physique et société

Les quelques thèmes abordés dans ce rapport illustrent la diversité des champs de la physique, et en particulier de la physique à l'INP, physique de la matière, physique de la lumière, physique des interactions fondamentales, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Nous, physiciennes et physiciens, sommes convaincus de la vitalité de notre science, de son apport et de son renouveau pour ou par d'autres disciplines (chimie, biologie, géologie, économie, sciences sociales, etc.), directement ou en termes de méthodologie, de son impact dans notre vie quotidienne.

Est-ce le cas des décideurs du monde politique et du monde socio-économique ? L'Ecole Nationale d'Administration, dont sont issus nombre de nos hauts fonctionnaires et de nos femmes ou hommes politiques, a mis en place un cycle de conférences autour des questions scientifiques d'actualité. L'objectif pour ses élèves est d'être en mesure de comprendre un discours scientifique, d'en percevoir les enjeux et de développer l'esprit critique propre à toute démarche scientifique. Cette initiative est récente : le cycle de conférence a débuté en avril 2018 ! Ce type de démarche nous semble à encourager et à étendre au plus grand nombre de formations possibles.

L'une des missions du CNRS est le partage du savoir avec le grand public. Le personnel de l'INP, chercheurs, ingénieurs et techniciens, prend une part extrêmement active à la « fête de la science », qui est un événement privilégié de rencontre avec le grand public, et il lui fait visiter ses laboratoires. Il est aussi largement impliqué dans la « nuit des chercheurs ». L'INP a été partie prenante d'événements de vulgarisation de grande ampleur en physique comme l'année de la supraconductivité en 2011, celle de la cristallographie en 2014 ou celle de la lumière en 2015. Les actions à l'échelle d'une délégation régionale sur un thème spécifique qui a un impact régional sont aussi à noter (le thème des microscopies a par exemple été retenu en 2016 par la délégation régionale Midi-Pyrénées). Soulignons enfin la participation de chercheurs de l'INP à des émissions de radio, de télévision ou pour répondre aux interrogations des journalistes de la presse écrite.

Le développement de formations à l'utilisation des nouvelles technologies en termes de vulgarisation (réseaux sociaux, YouTube, blogs spécialisés), pour les chercheurs intéressés, nous semble à encourager. L'INP pourrait par ailleurs proposer des ressources utilisables par les enseignants ou les étudiants, ou référencer des sites internet de bonne qualité.

Les approches de sciences participatives sont aussi à encourager. L'utilisation de jeux a permis d'identifier la structure de protéines liées à la transmission du virus de l'immunodéficience humaine ou de résoudre des problèmes complexes de physique quantique. Citons aussi le projet Galaxy Zoo dans lequel les volontaires sont invités à classer des images de galaxies ou le projet plus global SafeCast lancé au Japon après la catastrophe de Fukushima en 2011, où société civile et communauté scientifique ont travaillé ensemble pour développer un détecteur à bas coût utilisé aujourd'hui à travers le monde pour collecter et partager des données de radiation via le web. Le développement des approches de sciences participatives dans les domaines de la physique nous semble un défi particulièrement

intéressant, d'une part, pour développer l'intérêt du grand public pour la physique et la démarche scientifique associée et d'autre part, parce que cette approche a démontré sa capacité à produire des résultats scientifiques nouveaux en utilisant les aptitudes multiples des participants.