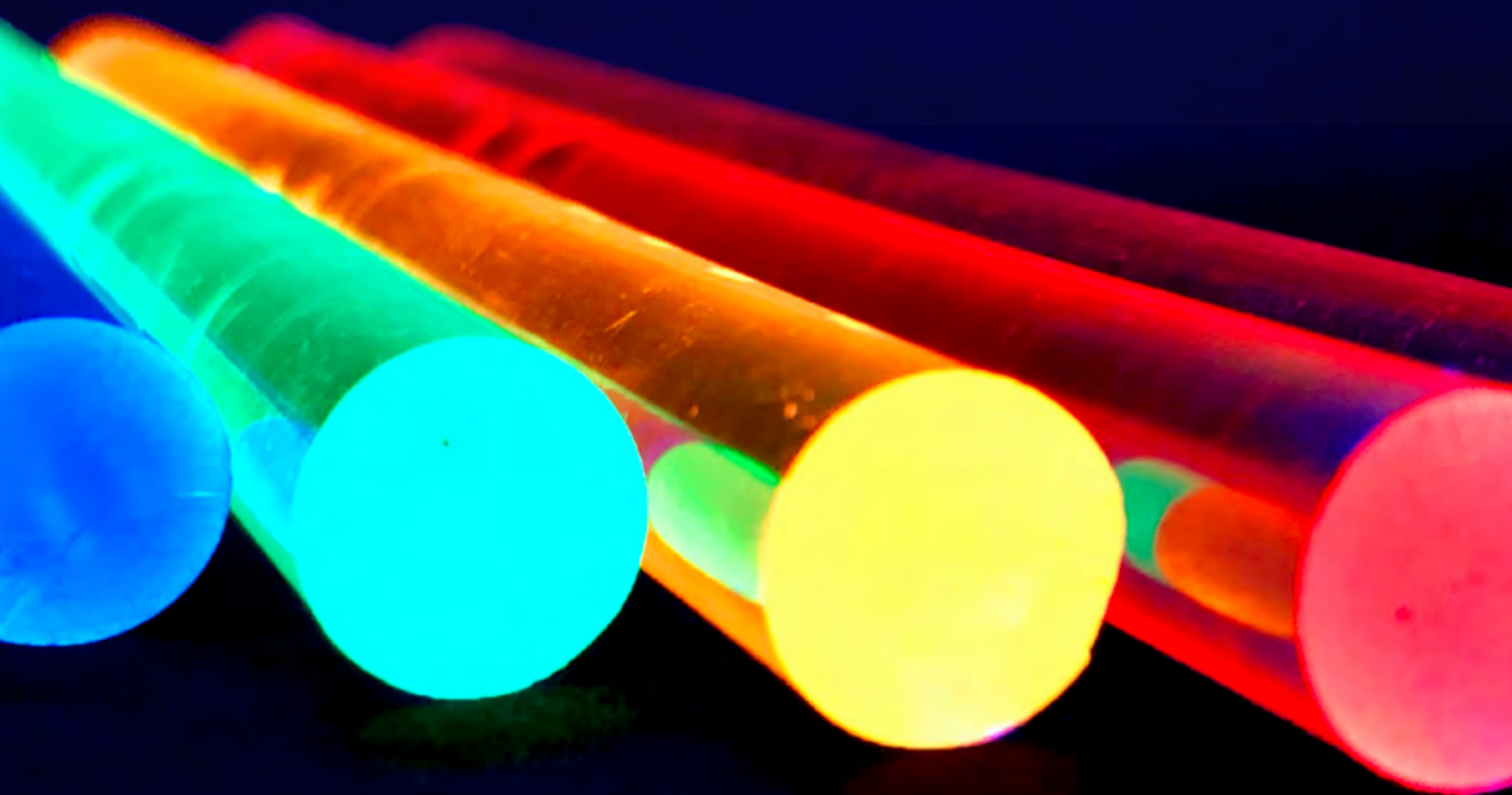


Prospectives de CNRS Physique

La physique à l'horizon 2030 :

recherche fondamentale et impacts sociétaux

2024



Prospectives de CNRS Physique

LA PHYSIQUE À L'HORIZON 2030 : RECHERCHE FONDAMENTALE
ET IMPACTS SOCIÉTAUX - 2024

Sous la direction de Thierry Dauxois et Frédéric Restagno

Coordination éditoriale

Frédéric Restagno et Pôle communication
de CNRS Physique

Conception / Maquette

Page B

Février 2024

Impression

CNRS IFSEM, secteur de l'imprimé



Sommaire

AVANT-PROPOS	6
ÉLECTRONIQUE ET PHOTONIQUE AVANCÉES	8
PHYSIQUE EN RÉGIMES EXTRÊMES	22
PHYSIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES	36
PHYSIQUE DE LA MATIÈRE COMPLEXE	50
MATIÈRE, LUMIÈRE ET PROCESSUS QUANTIQUES	64
PHYSIQUE DU VIVANT	78
LOIS FONDAMENTALES	90
NOUVEAUX ENJEUX POUR LES MÉTHODES NUMÉRIQUES	108
PHYSIQUE POUR LA SANTÉ	118
PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LE CLIMAT	130
PHYSIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT, L'URBAIN ET L'ALIMENTATION	144
PHYSIQUE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ET LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES	156
CULTURE SCIENTIFIQUE	166
PARITÉ ET DIVERSITÉ(S)	169
INTÉGRER LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX À LA RECHERCHE EN PHYSIQUE	172
REMERCIEMENTS	184

Avant-propos

La parution des prospectives 2024 de CNRS Physique est un moment important pour la communauté des physiciennes et des physiciens. La physique est une science fondamentale, qui nécessite des recherches sur le long terme, pouvant mener à des découvertes capitales susceptibles d'améliorer notre compréhension du monde. Les prix Nobel de physique des trois dernières années sur la physique des impulsions attosecondes, l'intrication quantique ou la compréhension des systèmes physiques complexes en témoignent. Au-delà du défi de rendre le monde intelligible, les questions posées à nos sociétés concernent la crise énergétique, le changement climatique, la perte de biodiversité, des ressources toujours plus difficilement accessibles... Les prospectives de CNRS Physique permettent d'envisager avec ambition et responsabilité un avenir dans lequel la physique permet de combiner l'action à la compréhension.

C'est dans cette perspective que CNRS Physique a lancé le travail sur ses prospectives au printemps 2022. Si certaines problématiques scientifiques sont au cœur des actualités, et continueront à faire vivre la physique dans les années à venir, un point crucial était d'identifier les questions en émergence, les thématiques frémissements susceptibles de conduire aux bouleversements de demain. Il s'agit là d'une ambition forte, mais qui a conduit dès le départ à penser que le résultat ne pourrait venir que d'un travail d'intelligence collective regroupant l'ensemble de notre communauté. La physique est présente dans d'autres instituts du CNRS : des physiciennes et physiciens de CNRS Chimie, CNRS Ingénierie, CNRS Nucléaire & Particules, CNRS Terre & Univers ont notamment participé activement aux discussions. Tout naturellement, des enseignants-chercheurs et des collègues d'autres organismes nationaux de recherche ont aussi pris part à ce travail. Nous souhaitons exprimer notre gratitude à tous et toutes, car à l'avenir la recherche de CNRS Physique devra continuer à être ouverte à tous les profils.

Le point de départ de cette prospective a consisté à réaliser une enquête en ligne entre la mi-mai et la mi-juillet 2022. Ce travail a permis de faire émerger plusieurs thèmes autour de deux volets (thématiques scientifiques en émergence pour le premier et grands défis sociétaux pour le second) qui donnent une vision de ce que sera la physique à l'échéance de 2030. Douze ateliers ont été constitués, animés par un binôme de physicienne et de physicien qui se sont rapidement entourés d'un bureau

de quelques personnes. Chaque bureau était accompagné par un représentant ou une représentante de CNRS Physique, délégué scientifique ou directeur adjoint scientifique. Entre décembre 2022 et juillet 2023, ces bureaux ont travaillé d'arrache-pied pour identifier les « pépites » de demain. Ils ont réalisé de nouveaux questionnaires complémentaires à l'enquête en ligne, interrogé des expertes et des experts de différents domaines, organisé des ateliers en ligne ouverts à toutes et tous, discuté avec les partenaires de CNRS Physique, se sont réunis, ont débattu. Plus de mille personnes ont participé à cet important travail. CNRS Physique tient à remercier chaleureusement toutes celles et tous ceux qui ont donné de leur temps pour ce travail majeur. Les noms des pilotes et des membres des bureaux des ateliers sont donnés à la fin de ce document. Une étape cruciale a été la remise à l'été 2023 des rapports des ateliers, distribués à toutes celles et tous ceux qui avaient souhaité suivre le travail de fabrication de cette prospective. Ces rapports ont été discutés et questionnés lors des journées de prospectives des 12 et 13 septembre 2023, lesquelles ont réuni plus 400 participantes et participants au siège du CNRS et en ligne. Toute la communauté avait été sollicitée à cette occasion, car définir l'avenir de CNRS Physique engage. C'est sur la base de ces rapports et des discussions qui ont suivi que CNRS Physique a rédigé ce rapport final qui constitue la vision commune des prospectives scientifiques. Il reflète encore, par une diversité de styles, la complémentarité des approches des différentes sous-communautés.

Le premier volet de ce rapport aborde les thématiques scientifiques en émergence ayant pour principal objectif une avancée de la connaissance. Huit thématiques ont été identifiées :

- Électronique et photonique avancées
- Physique en régimes extrêmes
- Physique des systèmes complexes
- Physique de la matière complexe
- Matière, lumière et processus quantiques
- Physique du vivant
- Lois fondamentales
- Nouveaux enjeux pour les méthodes numériques

Le second volet aborde les grands défis sociétaux mis en avant par les politiques publiques française et européenne :

- Physique pour la santé
- Physique pour le climat et l'énergie

- Physique pour l'environnement et l'alimentation
- Physique pour les technologies quantiques.

Ces deux volets permettent une lecture matricielle de la recherche à CNRS Physique: il existe plusieurs façons d'aborder un problème de physique. Le premier volet est celui d'une recherche fondamentale d'excellence motivée par la résolution de grandes questions scientifiques. Le deuxième volet est celui d'une recherche ancrée dans une société en transition, qui a besoin de réponses. Ces deux volets sont les entrées d'un même objet qui constituera le futur de CNRS Physique.

Au-delà de notre avenir scientifique, il était de la responsabilité de CNRS Physique de s'interroger sur nos pratiques collectives de la recherche. Un troisième volet de ce rapport a pour objectif de mettre en avant des questions transverses qui traversent toute la physique, et parfois la dépassent. Comme toute la société, la recherche en physique n'est pas exempte de biais de genre ou envers les personnes porteuses de handicap ou l'ensemble des diversités. L'identification de ces biais et de leurs conséquences sur les comportements ont fait l'objet de l'atelier parité et diversité qui a travaillé sur des constats et dont les recommandations générales ou spécifiques donneront lieu à des actions rapides de la part de l'Institut. Une autre question fondamentale est celle de la culture scientifique en physique, objet d'un deuxième atelier transverse. Cette culture permet à toutes et tous non seulement de comprendre le monde qui nous entoure, mais aussi de participer activement à son évolution. Elle contribue à la formation d'une société éclairée, capable de prendre des décisions informées sur différents sujets.

Faire de la physique dans le futur, c'est aussi prendre en compte désormais les contraintes incontournables de la crise climatique. Cette crise, prévue de longue date par les scientifiques, se matérialise et se répercute dans toutes les sphères de la société. Son intensité ne fera que s'accroître dans la prochaine décennie. La recherche en physique devra prendre sa part dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, aura à faire face à la diminution de certaines ressources qui la touche déjà, comme en témoigne la crise actuelle de l'hélium, sera questionnée par la société sur son utilité. Ne voulant pas ignorer ces questions, un atelier a été consacré aux impacts des transitions sur la recherche en physique. Il propose des idées qui ne font pas toutes l'unanimité.

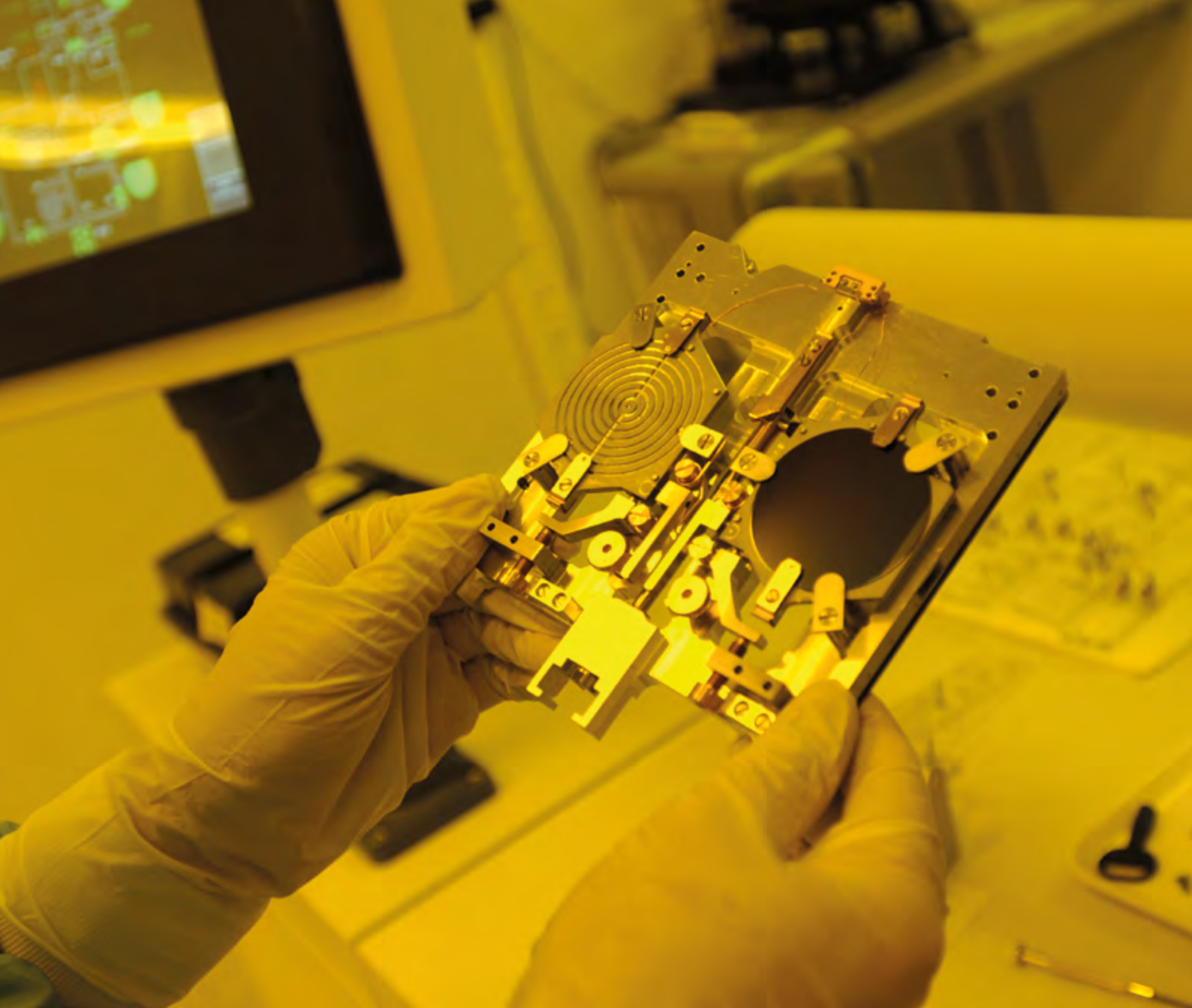
Néanmoins, il sera de notre responsabilité dans les années à venir de continuer à discuter cette question et à l'intégrer dans notre manière de faire de la recherche.

La période actuelle est particulière pour notre communauté. 2023-2024 est l'Année de la physique. Le Ministère de l'Éducation Nationale et de la Jeunesse, le CEA, le CNRS, France Universités, la Société Française de Physique, rejoints par de nombreux partenaires, souhaitent stimuler l'intérêt des élèves et du grand public envers notre discipline, notamment en montrant les multiples résultats de la recherche. Il y a là une résonance avec les prospectives 2024 de CNRS Physique qui identifient ce qui pourrait être l'avenir d'une recherche fondamentale de haut niveau en physique. Cet avenir ne pourra pas se faire sans moyens humains, financiers, organisationnels. Les orientations stratégiques, issues de ce travail scientifique, feront l'objet d'un document spécifique remis à l'été 2024. Ceci permettra de construire, ensemble, un futur dans lequel les sciences, et en particulier la physique, sont une partie des solutions aux questions de demain comme l'a très justement souligné Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022.

Au moment de présenter ces prospectives, gardons également à l'esprit ce que rappelait Anne L'Huillier, prix Nobel de physique 2023: «ce qui caractérise les découvertes expérimentales, c'est la surprise: vous essayez de faire quelque chose et vous trouvez autre chose». Restons prêts à accueillir de belles surprises !

Thierry Dauxois
Directeur de CNRS
Physique

Frédéric Restagno
Délégué scientifique
en charge du suivi des
prospectives



Travail en salle de lithographie électronique.
© Jérôme CHATIN/CNRS Images

Électronique et Photonique avancées

RÉSUMÉ

L'électronique, la photonique, la phononique et la science des matériaux sont des thèmes de recherche qui connaissent des évolutions fortes et rapides. L'approfondissement de nos connaissances dans ces domaines ouvre la voie à d'importantes avancées fondamentales et à de potentielles innovations de rupture. Mais quelles sont les questions fondamentales suscitant aujourd'hui l'attention, quelles sont les voies à suivre et où nous mènent-elles à l'horizon 2030 ? Ce sont les réponses de la communauté Électronique et Photonique Avancées (EPA) que ce document s'efforce de synthétiser le plus fidèlement possible.

Concernant l'**électronique**, les matériaux topologiques, les matériaux de van der Waals et la physique mésoscopique suscitent un vif intérêt, avec de nombreuses questions fondamentales et des avancées majeures attendues dans les prochaines années. Le magnétisme et la spintronique ouvrent de nouvelles perspectives, en particulier dans l'étude des ordres magnétiques, des textures de spin, de la dynamique d'aimantation et des phénomènes d'interconversion. L'électronique organique et moléculaire requiert quant à elle une compréhension approfondie des interfaces et des mécanismes de transport de charge à l'échelle moléculaire. Enfin, de nouveaux paradigmes de calcul émergent pour répondre aux besoins futurs de l'électronique. En ce qui concerne la **photonique**, les progrès dans les fibres optiques et les sources de puissance ouvrent de nouvelles perspectives de recherche. Il s'agit aussi de développer des circuits photoniques hybridant de nombreux matériaux et composants pour combiner différentes fonctionnalités. En nanophotonique se développent des nano —voire pico— cavités optiques pour exalter l'interaction lumière-matière. Les métasurfaces se déploient dans des dispositifs optiques et optoélectroniques, leur fabrication large échelle devenant un enjeu majeur, tandis que des métasurfaces actives, dynamiques et reconfigurables sont à explorer. Un champ de recherche vise à étudier l'influence du degré de désordre des surfaces nanostructurées sur les propriétés optiques et le contrôle des ondes. Enfin, l'acousto-optique étudie le couplage phonons-photons pour des oscillateurs nano-optomécaniques intégrés et hybrides. En **phononique**, les défis incluent la compréhension du transport de chaleur à petite échelle, en particulier dans des milieux complexes et confinés, ainsi que le transport de chaleur dans des nano-objets et les interactions phonon-interface. De plus, l'effet thermique et thermoélectrique dans les matériaux innovants offre des perspectives prometteuses pour des applications en thermoélectri-

citée et en récupération d'énergie. Les **matériaux** de demain incluent notamment les matériaux 2D, les semi-métaux de Dirac, les composés organiques, les oxydes fonctionnels, les matériaux à changement de phase, les métamatériaux à base d'oxydes, ainsi que leur hybridation. La durabilité et le respect de l'environnement sont des préoccupations croissantes, tout comme la mise à l'échelle des matériaux et la nano-structuration. Le design inverse, l'intégration multi-échelle et la convergence des technologies sont des aspects clés. Pour progresser, il est également nécessaire de développer de nouveaux procédés de synthèse et d'hybridation, ainsi que des outils de modélisation et de caractérisation. Ces derniers combineront les mesures spatiales, spectrales et temporelles en repoussant les limites de résolution, et s'orientent vers des mesures simultanées multi-stimuli, multi-paramètres ou *operando*. **L'Intelligence artificielle (IA)** accélère le design inverse et le co-design des matériaux et dispositifs, avec des questions subsistant quant à l'évaluation des résultats et la faisabilité expérimentale. Enfin, la **multidisciplinarité** sera essentielle pour aborder les questions communes à la physique, à l'algorithmique, au traitement du signal, à la bioinspiration, etc.

Électronique et Photonique avancées

ÉLECTRONIQUE

PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES DES MATÉRIAUX TOPOLOGIQUES

Malgré leur protection topologique, la quantification des états de bords dans les isolants topologiques 2D reste étonnamment fragile. Un problème connexe concerne la présence d'états conducteurs parasites au cœur des matériaux topologiques. La résolution de ces problèmes permettrait d'utiliser ces états exotiques dans diverses applications. Néanmoins, un grand nombre de questions du domaine sont uniquement motivées par la curiosité scientifique. Par exemple, quelle est l'influence du désordre sur les propriétés de transport des isolants topologiques? Un défi majeur consiste aussi en une classification géométrique et topologique des électrons en interaction. Un matériau non-topologique peut-il devenir topologique grâce à ces interactions électron-électron? La surface d'un isolant topologique magnétique peut-elle héberger de nouveaux états topologiques sous l'action des interactions? Par ailleurs, certaines symétries cristallines associées à de multiples inversions de bandes peuvent créer des systèmes topologiques d'ordre supérieur de dimension N , abritant des états de bords de dimension $N-2$ ou $N-3$, au lieu de $N-1$. De même, les phases topologiques dans les matériaux amorphes, ou encore les anomalies chirale ou gravitationnelle associées aux fermions de Weyl doivent être explorées. Enfin, le concept de topologie s'est récemment révélé extrêmement utile dans la classification d'autres bandes d'énergie dispersives dans les solides, notamment pour les magnons ou les phonons. Des avancées fondamentales sont attendues sur l'ensemble de ces sujets.

MATÉRIAUX BIDIMENSIONNELS ET SYSTÈMES MULTIFONCTIONNELS

La superposition de matériaux de van der Waals et les effets de proximité associés ont ouvert de vastes champs d'investigation incluant la twistronique et la physique des moirés, la spin-orbitronique, les phases hors équilibre, etc. La combinaison de ces différentes interactions, parfois antagonistes et induisant donc une frustration, représente une activité de recherche prolifique. Des découvertes de rupture surviennent telles que les matériaux à la fois magnétiques et ferroélectriques, le développement de la valléetronique, ou l'effet Hall quantique fractionnaire. Il faut aussi souligner l'apparition récente de structures latérales composées de plusieurs matériaux

et de monocouches de type Janus, possédant des propriétés différentes d'un côté et de l'autre du feuillet. Un travail théorique et expérimental conséquent reste à accomplir dans tous ces domaines pour comprendre les diagrammes de phases et sonder les différentes excitations. Un travail de modélisation est aussi nécessaire pour aider les expérimentateurs à faire le choix de matériaux en fonction des propriétés visées. Compte tenu du grand nombre d'avancées majeures dans ce domaine, il est fort probable que plusieurs nouvelles percées fondamentales y soient encore faites ces prochaines années. De nombreuses questions fondamentales sont d'ailleurs déjà identifiées. L'effet Hall quantique de vallée sans champ magnétique existe-t-il dans le graphène bicouche twisté? Peut-on observer les phases semi-métalliques de Weyl dans des réseaux de Kagomé? Quels sont les mécanismes à l'origine du magnétisme orbital?

SYSTÈMES MÉSCOPICIQUES

Malgré le niveau de maturité actuel de la physique mésoscopique en matière de concepts et de qualité des matériaux étudiés, un grand nombre de questions fondamentales subsistent. Dans une approche unifiée du transport quantique et de l'optique, quels effets sont induits dans les dispositifs mésoscopiques par le couplage fort avec la lumière? Au-delà des préceptes de la thermodynamique classique, peut-on extraire un travail de systèmes mésoscopiques? Comment manipuler les anyons et étudier le transport de chaleur associé en régime d'effet Hall quantique fractionnaire? La génération et le contrôle d'électrons uniques et de charges fractionnaires, autant que la nécessité d'augmenter la température de mesure, impliquent une prochaine montée en fréquence du GHz au THz. Il faudra aussi inclure les défauts et le désordre dans les modèles et développer une instrumentation de mesure appropriée qui en tiendra compte. L'instrumentation devra permettre de se libérer des pertes et du bruit induit par les distances et les connexions sur les signaux faibles et il sera nécessaire de développer de nouveaux dispositifs tels que des convertisseurs optique/micro-ondes, ou des amplificateurs paramétriques à la limite quantique. L'utilisation des matériaux 2D (couplage spin-orbite par effet de proximité, supraconductivité...) et des matériaux topologiques devrait aussi se développer.

MAGNÉTISME ET SPINTRONIQUE

Quatre vecteurs de défis et de gain de nouvelles connaissances sont identifiés dans ce domaine.

Les ordres magnétiques et textures de spin apporteront des interactions, effets et fonctionnalités nouveaux en lien avec des degrés de liberté additionnels tels que la chiralité, la frustration, les dimensionnalités hautes et hybrides (espace et champ vectoriel), les symétries cristallines, les effets de courbure, les couplages renforcés. Ils permettront l'émergence de pseudo-particules topologiques avec leurs comportements propres : skyrmions, hopfions et autres textures 3D, monopoles, points de Bloch, etc. Cela nécessitera des efforts en synthèse de composés massifs ou en couches minces et hétérostructures, par des voies ascendantes dont chimiques (ALD, électrochimie), incluant les matériaux 2D pour leurs couplages exaltés et multiphysiques.

La dynamique d'aimantation apportera à la fois un degré de liberté supplémentaire (le temps) pour une physique plus riche, et de nouvelles fonctionnalités. Les frontières sont la maîtrise et compréhension des échelles de temps ultimes (ps-fs-as) ou en domaine fréquentiel équivalent, en fort lien avec l'optique; le comblement du gap THz dans une bande large et efficace, par les effets spintroniques ou les électromagnons; le contrôle et la physique de la cohérence et du couplage de nano-oscillateurs à transfert de spin. Les frontières de la magnonique sont la compréhension et la maîtrise de la décohérence et des pertes (micromagnétisme, problématique matériaux), l'hydrodynamique et le chaos, et leur utilisation pour de nouveaux paradigmes de traitement de l'information, en lien avec les effets quantiques. Ceci nécessite des progrès en instrumentation pour exciter et mesurer à ces échelles, et pour les matériaux, d'identifier ceux permettant le meilleur couplage à l'excitation/mesure (hétérostructures et interfaces) ou la montée en fréquence (antiferromagnétiques, etc.).

Les phénomènes d'interconversion seront clefs dans les progrès, comme moyens d'exciter ou détecter, ou de coupler des phénomènes divers. Les couplages historiques devront être renforcés : spin-charge, champ électrique/ferroélectrique, multiferroïques, matériaux topologiques, récupération d'énergie, capteurs magnétiques. Une multitude de couplages plus exotiques émergent, ouvrant des voies nouvelles à l'interface de différentes communautés : moment angulaire de spin versus moment orbital, génération de courants d'électrons chauds, altéromagnétisme dans les antiferromagnétiques, spin-réseau dont contraintes et phononique de moment angulaire, photonique (spin-LED, VECSEL), interface spintronique/supraconducteurs. L'ensemble requerra de nouvelles instrumentations, des théories et outils de simulation multiphysiques, des efforts en science des matériaux pour exalter et varier les couplages (y compris matériaux 2D, moléculaires, quantiques, et leurs compatibilités), ainsi qu'un effort en métrologie.

Les nouveaux paradigmes de traitement de l'information reposent sur la mise à profit d'effets physiques connus pour obtenir une fonctionnalité nouvelle en logique. Les effets spécifiques de non-linéarité, stochasticité et hysté-

résis des systèmes magnétiques sont une force pour réaliser un ensemble de fonctions complexes avec un unique support, ce que ne permettent pas d'autres matériaux. Ceci inclut le calcul probabiliste (fluctuations thermiques, grand nombre de degrés de liberté), les non-linéarités de dynamique d'aimantation (oscillateurs individuels ou magnonique), des phénomènes de reptation, pour réaliser des composants de type neurones, synapses, ou de *reservoir computing*.

ÉLECTRONIQUE ORGANIQUE ET MOLÉCULAIRE

Pour imaginer de nouvelles fonctionnalités ou améliorer la stabilité des dispositifs, il s'agira de mieux observer et comprendre les interfaces et les mécanismes de transport de charge électronique et ionique à l'échelle moléculaire. En particulier, le transport électronique et ionique au sein de la molécule, à l'interface avec son support et son environnement (effet du greffage, adsorption, de la configuration moléculaire), mais aussi à l'échelle intermoléculaire sur de courtes distances (1-10 nm). L'étude des mécanismes d'échange ionique jusque-là considérés comme instabilités permettra d'éviter, ou au contraire d'exploiter les perturbations induites (échange possible d'information dans des systèmes moléculaires à comportement synaptique; compréhension de l'effet des stimuli externes comme la lumière, le champ magnétique, les paramètres environnementaux, etc.).

Ces recherches contribueront au contrôle des jonctions et composants moléculaires. Ainsi, la rectification de courant prédite par combinaison de groupements «donneur» ou «accepteur» reste un verrou expérimental (réalisation du dopage, transport de charge aux interfaces molécule/électrode notamment molécules/matériaux 2D comme le graphène ou dichalcogénures du type MoS_2). L'introduction de matériel biologique dans les jonctions et dispositifs représente également les prémices d'une recherche bio-inspirée multidisciplinaire : chimie, physique, biologie, traitement du signal. Des systèmes moléculaires synaptiques ou pour le calcul *in materio* pourraient être conçus. Finalement, l'exaltation localisée de réaction ou d'échange chimique par des points chauds, ou les mécanismes de transport thermique à l'échelle de la molécule, restent à étudier pour maîtriser la réactivité chimique à cette échelle. Le succès de ces études vers la découverte de nouvelles fonctions (pour une chimie efficace, les capteurs, ou le calcul) dépendra des avancées conceptuelles combinées aux progrès de la synthèse chimique large surface et du traitement du signal (bruit de fond et fluctuations).

NOUVEAUX PARADIGMES DU CALCUL

Le calcul «en-mémoire» requiert de nouveaux matériaux et nanocomposants, fiables, pilotables rapidement (ns) et sans dérive de leurs propriétés à long terme. Une grande diversité d'approches coexistent. L'étude des mécanismes physiques en jeu dans le nano-composant, responsables des propriétés recherchées aux échelles nano

(typiquement 20 nm), est primordiale : conservation des propriétés volumiques à cette échelle ; prédominance des mécanismes de surface ; maîtrise de la variabilité statistique des propriétés physiques devenant critique pour des mémoires multi-niveaux.

En calcul neuromorphique, un verrou existe en physique pour dépasser des limites de l'algorithmique de l'apprentissage automatique, et aller vers un apprentissage continu. Des matériaux associant forte non-linéarité et non volatilité sont à rechercher. Les composants ferroélectriques sont prometteurs, sans négliger des alternatives en rupture (e. g. approches biomimétiques fondées sur le principe de plasticité), ni l'impact de nouvelles solutions algorithmiques (e.g. approches bayésiennes) avec une interface directe nécessaire entre le développement des nano-composants et la théorie des réseaux d'apprentissage (apprentissage automatique/continu ; théorie de l'oubli).

Finalement, des difficultés se posent pour le pilotage de réseaux neuromorphiques de grande dimension qui requièrent dès le départ une loi énergétique de passage à l'échelle réaliste. Un calcul à grande efficacité énergétique « scalable » passera par une nouvelle physique des composants pour des opérations de calcul au plus proche du résultat final directement par la couche physique, et par le développement de la physique des couplages en réseau. Les approches électroniques inorganiques sont à comparer aux alternatives organiques/moléculaires, ou hybrides photonique-électronique avec tout ou partie des opérations de mémoire-calcul réalisées en optique. Cette branche de la physique dépendra du développement d'approches profondément 3D (fabrication 3D à l'échelle micro-nano ; méthodes d'élaboration capables de plasticité).

PHOTONIQUE

FIBRES OPTIQUES ET SOURCES DE PUISSANCE

La maîtrise de nouvelles géométries de fibres optiques (multicœurs/multimodes, creuses, dopées, nanofibres, à base de nouveaux matériaux) ouvre de nouveaux champs de recherche.

Le multiplexage spatial dans les fibres multicœurs/multimodes, dans lesquelles les processus d'amplification et d'interactions non-linéaires entre modes restent incomplètement maîtrisés, de même que le contrôle angulaire en phase de ces modes.

La minimisation des non-linéarités et des pertes dans les fibres creuses pour le transport longue distance sans distorsion de faisceau intense, et au-delà de la bande télécom (visible, MIR).

L'exploitation des effets non-linéaires pour les sources et l'imagerie de fonctions actives : capteurs, convertisseurs de longueur d'onde, sources, peignes de fréquences mul-

tiples devant gagner en stabilité (bruit de phase et cohérence), extension ($> \mu\text{m}$), et domaine spectral (UV et IR).

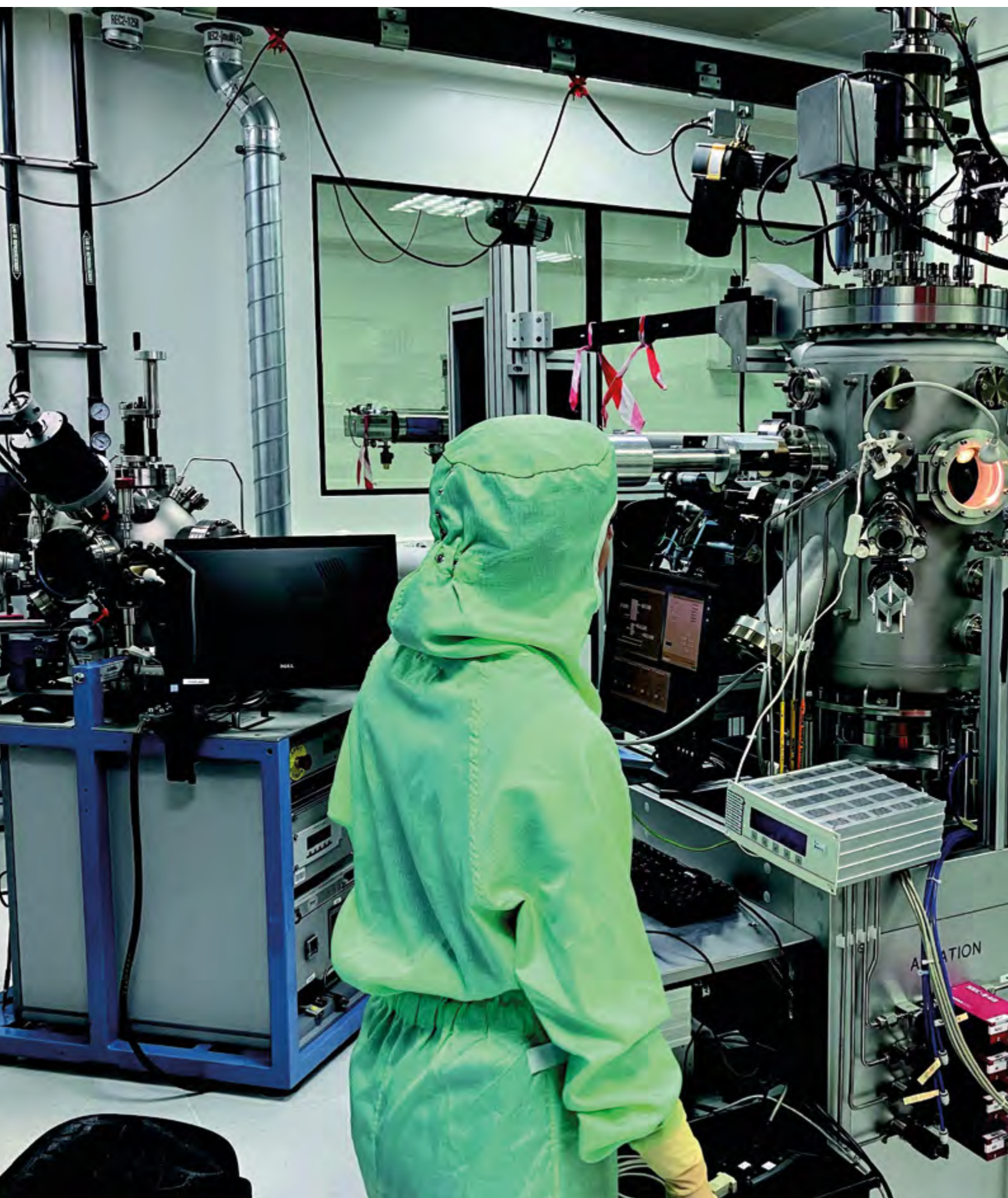
Les avancées conceptuelles et expérimentales sont conditionnées par la qualité, l'uniformité, la faible rugosité des matériaux et des géométries sur grande distance. Des modèles temporels assistés par apprentissage automatique couplés à la théorie de l'information permettront de comprendre les événements non-linéaires extrêmes (turbulence, chaos spatio-temporel). Une limite des sources et amplificateurs paramétriques fibrés pour la tenue au flux existe au mJ. Si les fibres peuvent s'implanter dans les premiers étages d'amplification, la puissance ultime requiert de l'optique de volume (cristaux massifs) en espace libre où les enjeux en conception et fabrication sont similaires : contrôle spatial et modal, extension spectrale, effets non-linéaires, transverses et de bord, thermo-optiques, grandes dimensions.

PHOTONIQUE INTÉGRÉE, COMPLEXE, ET MULTIFONCTIONNELLE

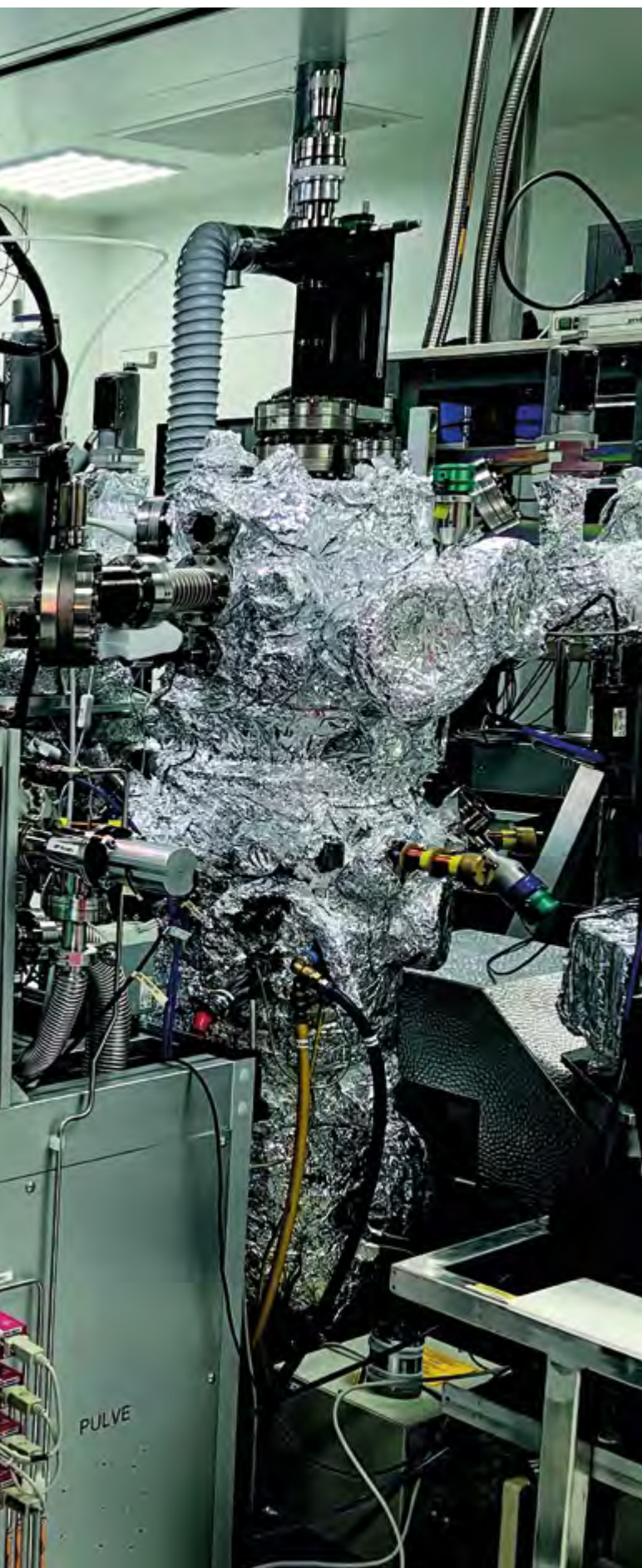
Les avancées des circuits photoniques intégrés reposent sur la compréhension et l'exploitation des interactions lumière-matière aux échelles sub-longueurs d'ondes et sur l'amélioration des matériaux et des procédés technologiques. Afin de répondre aux enjeux des technologies de l'information et du quantique, il sera essentiel de développer des circuits photoniques aussi complexes que des circuits électroniques, intégrant de nombreux composants et réalisant des fonctions diverses.

Circuiterie photonique ultra dense : la complexité des circuits photoniques est corrélée à notre capacité à y intégrer un grand nombre de composants. Le premier enjeu est de pouvoir y réaliser des opérations passives telles que guider la lumière quasiment sans perte, la filtrer spatialement ou spectralement à volonté, et cascader facilement ces opérations. Les performances attendues, en particulier pour les circuits photoniques quantiques, sont très au-delà de l'état de l'art actuel. Pour les atteindre, il faudra réaliser un saut technologique permettant de structurer la matière (semi-conducteurs ou diélectriques) avec une précision quasi atomique, de façon reproductible. L'augmentation de la dimensionnalité des architectures de circuits du 2D au 3D ou 4D (circuits reconfigurables temporellement) permettra d'imaginer de nouveaux agencements des liens photoniques sur puce. Ceci répondra notamment aux besoins d'interconnexions riches dans les circuits photoniques pour les réseaux neuronaux, ou l'astrophotonique.

Intégrer de la multifonctionnalité : les matériaux utilisés en photonique intégrée pour la réalisation des différentes fonctionnalités (guides, sources, détecteurs, modulateurs...) sont pléthoriques. Les semi-conducteurs III-V, le silicium, le germanium, le nitrure de silicium, le niobate de lithium, les chalcogénures, les matériaux 2D, des polymères, des oxydes fonctionnels, les métaux nobles, les matériaux supraconducteurs en font partie. Cepen-



Salle blanche pour la fabrication de micro-dispositifs. © Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies.



dan, aucune famille de ces matériaux ne possède toutes les propriétés physiques nécessaires à la conception de tous les composants d'un circuit. Des plateformes hybrides intégrant plusieurs de ces matériaux (limités à seulement 2 aujourd'hui) ont émergé, apportant de nouvelles pistes d'exploration pour la photonique intégrée. Elles permettent d'envisager de nouvelles architectures de circuits multifonctionnels jusqu'ici irréalisables (par ex. des circuits photoniques quantiques intégrant des sources à photons uniques en semi-conducteurs III-V, des guides d'ondes à très faibles pertes en SiN, des modulateurs électro-optiques en LiNbO₃ et des détecteurs supraconducteurs en NbN). Elles sont aussi une nouvelle source d'inspiration pour l'étude de phénomènes physiques issus de l'association des propriétés spécifiques des différents matériaux (comme la photonique non hermitienne mélangeant gain et pertes).

Photonique active: la miniaturisation, l'augmentation de la bande passante, la réduction de la consommation énergétique seront encore des enjeux majeurs pour la conception des composants photoniques. Les limites sont repoussées en inventant de nouvelles configurations optiques permettant de confiner la lumière dans des volumes de matière toujours plus petits et d'utiliser des matériaux toujours plus efficaces en termes de non-linéarités ou d'effets électro-optiques. L'utilisation de nouveaux outils numériques prenant en compte l'aspect multi-physique des effets à exalter sera à la base des progrès à venir. Les recherches sur les composants actifs (sources, détecteurs, modulateurs, transistor/portes non-linéaires optiques...) seront intimement liées aux besoins des circuits photoniques en convergence avec la microélectronique (interfaçage optique d'unité de calculs ou de neurones électroniques), le calcul et le traitement du signal tout optique ultra-rapide, ou les communications et le calcul quantique. La variété de ces applications et leurs exigences en termes de performances nécessitent l'exploration de nouveaux concepts, mais aussi de nouveaux composants (isolateurs optiques intégrés, nanolasers autopulsants, supercontinua ultra large bande, peignes de fréquence accordables, portes optiques quantiques, etc.).

Régimes non-linéaires en couplage fort photon-excitons/électrons - polaritonique: le couplage des modes photoniques avec des excitations matérielles (exciton, transitions inter-sous bande, plasmons, phonons...), modifie les propriétés lumière-matière de manière intéressante pour la photonique intégrée: fortes non-linéarités optiques, gain sans inversion de population, etc. Ces propriétés sont à explorer grâce aux plateformes telles que les cristaux photoniques ou les métasurfaces, et en s'appuyant sur les concepts de la photonique topologique, pour déboucher peut-être sur des lasers à bas seuils, peignes de fréquences, modulateurs rapides, émetteurs de faisceaux complexes, dont le déploiement dépendra aussi de la découverte de matériaux et configurations permettant une commande électrique et le fonctionnement à température ambiante. Dans le MIR/

THz, le caractère collectif/cohérent des excitations matérielles est un défi pour l'excitation électrique, mais les forts couplages lumière-matière ouvrent des perspectives pour les dispositifs (fonctions non-linéaires, détecteurs, sources non-conventionnelles, etc.).

Extension du domaine spectral au MIR et THz: le gap THz n'est pas encore couvert et les émetteurs MIR doivent encore être améliorés. De nouveaux peignes de fréquences et des émetteurs submillimétriques par photo-mélange MIR seront donc développés, ainsi que des lasers MIR inter-sous-bandes à base de métasurfaces, contrôlant de manière dynamique le spectre, la polarisation et la direction de la lumière. À l'horizon 2030, les systèmes optiques réalisés par ajout de composants tendront à disparaître au profit de composants à base de métasurfaces couplées à des optiques *freeform*. Les QCL seront incorporés aux circuits photoniques et leur réponse ultrarapide et non linéaire sera exploitée. La spectroscopie THz ultra-haute résolution permettra d'étudier de nouvelles familles de molécules et de détecter d'éventuelles variations temporelles des constantes fondamentales. Des impulsions THz contrôleront un électron unique au sein de systèmes quantiques. Les expériences non-linéaires et pompe-sonde THz révéleront de nouveaux processus physiques en matière condensée, et les matériaux 2D ou les boîtes quantiques seront largement utilisés pour les technologies MIR et THz. Au-delà des futures technologies, un grand nombre de questions fondamentales associées au MIR et au THz sont en suspens. Parmi celles-ci: quelles sont les propriétés optiques des excitons de Rydberg, comment exalter l'interaction lumière-matière et comment générer et détecter des états comprimés de la lumière?

PHOTONIQUE SUB-LAMBDA, MÉTASURFACES ET OPTIQUE EN MILIEUX COMPLEXES

Métasurfaces pour le contrôle des propriétés de la lumière: les métasurfaces ou surfaces optiques planaires nanostructurées aux échelles sub- λ représentent un enjeu scientifique et industriel dans de nombreux domaines (photo-détection, lidars, imagerie, spectro-polarimétrie, optique non-linéaire et technologies quantiques), et leur intégration dans des systèmes optoélectroniques ou de l'instrumentation permettra d'introduire de manière compacte de nouvelles possibilités de mise en forme de faisceau et de détection. Cet essor nécessitera un contrôle des procédés de nanostructuration à large échelle. Parallèlement, le contrôle de la dynamique de la réponse de ces métasurfaces devrait se développer pour commander activement (électriquement, optiquement) la polarisation, le spectre, la phase de l'onde optique. Les métasurfaces dynamiques (ajout de la composante temporelle comme degré de liberté) ouvrent aussi des perspectives intéressantes comme pour la synthèse de milieux non réciproques. Plusieurs approches sont prometteuses pour ces recherches: les cristaux liquides, le contrôle de la densité de porteurs dans les semi-conducteurs, la modulation électro-optique (e.g. sur LNOI), les polymères

conducteurs et matériaux à changement de phase (GST, VO₂), la modulation thermique. Le développement des métasurfaces à haut facteur de qualité sera important dans ce cadre. Leur couplage en champ proche avec des sources intégrées permettra également d'exalter les taux d'émission ou de générer des états de polarisation et des moments angulaires orbitaux spécifiques. Enfin, d'autres routes seront possibles comme celle du calcul analogique optique. Toutes ces recherches nécessiteront le développement de méthodes numériques et analytiques pour modéliser et analyser les réponses optiques des dispositifs. La conception inverse, les méthodes d'optimisation et d'apprentissage joueront un rôle important pour déterminer des réponses optiques spécifiques complexes (filtrage spectral, contrôle de la polarisation, exaltation de champ proche ou rayonnement en champ lointain, etc.).

Couplages hybrides phonons-photons, et acousto-optique en nanophotonique: des métasurfaces dédiées à la phononique et la nanothermie permettront le contrôle (angulaire, spatial, temporel) du rayonnement thermique. Les retombées pour le refroidissement radiatif, ou les super-isolants, seront partiellement conditionnées par la structuration sub 100 nm des surfaces et matériaux à grande échelle, de manière déterministe, ou en exploitant un désordre corrélé.

Des oscillateurs nano-optomécaniques intégrés, hybrides (piézo en films minces, PCM) plus efficaces (adaptation modale) restent à concevoir pour générer ou détecter des signaux RF/micro-ondes sur porteuse optique spectralement purs. Ils seront le fondement de nouvelles recherches pour des oscillateurs reconfigurables ou des réseaux d'oscillateurs couplés en vue du calcul analogique.

Optique des milieux complexes: l'intégration de motifs structurés et désordonnés avec divers degrés de corrélation à des milieux complexes permettra d'ajouter des fonctionnalités comme l'absorption des ondes ou la transparence des milieux complexes. L'étude du rôle des nanostructures interagissant de manière résonnante avec la lumière, du couplage inter-particules et/ou milieux stratifiés, de leur degré de corrélation, mais aussi des effets d'inter-réflexion entre les surfaces sur les rendus visuels sera un axe majeur pour lequel la modélisation multi-échelle jouera un rôle primordial. Les approches de conception inverse de métasurfaces désordonnées émergent dans le domaine des micro-ondes et les prochaines années les verront investir le domaine spectral visible. Un axe de recherche clé portera sur l'étude du désordre corrélé et sur l'impact du degré de corrélation sur le rendu visuel de matériaux artificiels ou biologiques. La nature est aussi une source d'inspiration pour les structures photoniques. La synthèse et la structuration ou l'assemblage de nanomatériaux sur de larges surfaces seront également des moteurs pour ces études. Par ailleurs, les thématiques des milieux complexes et de l'optique quantique se révèlent très complémentaires, au tra-

vers du suivi des états quantiques de la lumière en milieu désordonné. Les technologies quantiques bénéficieront des avancées en contrôle de front d'onde pour générer des états quantiques de la lumière de haute dimension avec des retombées dans le cryptage de données ou le contrôle des ondes dans les dispositifs de calcul quantique.

Nanophotonique diélectrique et plasmonique pour l'exaltation des interactions lumière-matière : l'étude de la chiralité devrait poursuivre ses progrès afin d'atteindre une résolution de détection à l'échelle de la structure unique (protéine, peptide, molécule...), idéalement en milieu biologique (comme à l'intérieur même d'une cellule), ce qui permettra de suivre la dynamique de conformation. L'objectif est de développer des nanostructures générant de grandes densités de chiralité dans le volume centré sur l'objet chiral d'intérêt, en exaltant et contrôlant en phase des champs magnétique et électrique intenses. Les perspectives intéressantes sont la détection de molécules chirales, mais aussi la génération de champ magnétique statique photo-induit et le contrôle du facteur de Purcell magnétique ou électrique. La nanophotonique UV sera également amenée à poursuivre son essor. Cette gamme spectrale correspond à un maximum d'absorption des cycles nucléiques (désinfection UV), à l'autofluorescence des protéines permettant leur détection, à l'absorption de molécules chirales. L'exaltation de l'interaction lumière-matière sera également exploitée pour augmenter l'efficacité de la photocatalyse à petite échelle (e.g. réactions de réduction d'oxygène, synthèse de H_2 à partir de H_2O ou de NH_3). En général, l'interaction lumière-matière à des échelles nanométriques jouera un rôle clé dans l'amélioration des capteurs optiques, la spectroscopie exaltée, et l'amélioration de l'efficacité des sources. Le contrôle de la position et de l'orientation des émetteurs dans ces cavités constitue un enjeu pour la synthèse de sources de photons uniques brillantes et couplées à des circuits photoniques. Finalement, les cavités optiques aux échelles sub-nanométriques seront des plateformes efficaces pour la rectification optique et pour atteindre le régime de couplage fort avec des perspectives intéressantes en chimie polaritonique, et l'intégration de matériaux comme les monocouches de dichalcogénures de métaux de transition en pico-cavité permettra de démontrer des fonctions optoélectroniques avec quelques atomes.

PHONONIQUE

Si la physique des photons et des électrons commence à être très bien maîtrisée, il n'en est pas encore de même pour des quasi-particules que sont les phonons, responsables du transport de la chaleur, de la propagation du son, mais qui sont aussi à l'origine de phénomènes d'interaction avec les photons et les électrons. La (nano)-phononique est une science en émergence depuis une vingtaine d'années autour de laquelle la communauté française est particulièrement organisée et une des plus actives en Europe. Nous nous intéressons ici aux effets

de structuration de la matière à très petites échelles de longueur sur les propriétés thermiques et de transport de phonons. À ces dimensions nanométriques, les lois que nous connaissons comme la loi de Fourier deviennent caduques et les mécanismes d'échange de chaleur par les phonons doivent être complètement repensés.

TRANSPORT DE CHALEUR À PETITE ÉCHELLE

Deux longueurs caractéristiques permettent de comprendre les mécanismes à l'origine du transport de chaleur par les phonons : les longueurs d'onde dominantes et le libre parcours moyen inélastique des phonons. Si les dimensions d'un objet sont plus petites qu'une de ces longueurs alors les lois habituelles telles que la loi de diffusion de Fourier ne s'appliquent plus. Un des enjeux à venir est de démontrer des effets originaux de confinement de phonons (transport balistique et prépondérance de l'hydrodynamique des flux de phonons). Ceci nécessite de comprendre le transport des phonons en milieux complexes (diffusion en milieux confinés, diffusion hiérarchique, diffusion sur défauts organisés, milieux désordonnés tels que verres, TLS). L'enjeu est de mettre en évidence des effets cohérents sur les flux de chaleur dans des limites de transport balistique de type Landauer par la mesure des flux de phonons en conditions extrêmes (petites dimensions et basse température). Un des grands défis à venir repose sur la maîtrise de ces concepts, pour nous amener à manipuler et contrôler les flux de chaleur à façon comme dans des métamatériaux thermiques (cristaux phononiques).

TRANSPORT DE CHALEUR DANS LES NANO-OBJETS

Dans les matériaux nanostructurés ou les nano-objets, les enjeux portent sur les multiples effets d'interfaces entre la structure de taille réduite et son environnement. Les phénomènes physiques présents aux interfaces tels que l'interaction phonon-particule (électron, polariton ou plasmon) doivent être maîtrisés afin de mieux comprendre les transferts électriques et thermiques au contact. Les transferts de chaleur dans les contacts ponctuels restent assez inexplorés, en particulier en ce qui concerne la quantification des flux dans un canal unique, les effets tunnel de phonons, ou les effets d'interférence du paquet d'onde. Enfin, une des directions de la nanophononique à l'interface de l'électronique moléculaire est la mesure thermique à l'échelle de la molécule unique, un enjeu majeur pour la compréhension des transferts de chaleur dans des canaux quasi-1D à l'échelle de quelques nanomètres comme par exemple dans des objets biologiques (ADN et origami d'ADN) ou les bilans thermodynamiques dans la cellule vivante où les mitochondries impliquent également les modes vibration.

NANOACOUSTIQUE ET OPTOPHONONIQUE

La physique des phonons ne se résume pas à des aspects thermiques où la distribution est polychromatique.

La manipulation de phonons acoustiques monochromatiques fait aussi partie des enjeux futurs en particulier en ce qui concerne des super-réseaux acoustiques. Dans ces systèmes, il est souhaitable de faire de l'ingénierie des vibrations mécaniques de haute fréquence. Le confinement acoustique peut amener des effets topologiques ou de la colocalisation des phonons et photons dans les mêmes cavités optophononiques que l'on mesurera par spectroscopie Brillouin. L'étude des phonons hors équilibre est également prometteuse.

EFFETS THERMIQUES ET THERMOÉLECTRIQUES DANS LES MATÉRIAUX INNOVANTS

Tous les aspects thermiques (transfert et dégagement de chaleur, profil de température) ont été très peu étudiés sur les nouveaux matériaux 2D comme les TMD (dichalcogénures de métaux de transition) ou les isolants topologiques. C'est pourtant essentiel au vu de leur fort potentiel d'applications. Deux exemples : la gestion de l'énergie en thermoélectricité (texturation hiérarchique) permettra des augmentations de performances grâce aux changements d'échelle ; l'utilisation de nanoparticules permettra des applications biomédicales pour le traitement thermique localisé de tissus.

L'apparition des nano-objets (nanoparticules, nanofils, membranes, 2D) est un accélérateur pour le développement de nouvelles techniques expérimentales qui permettront de sonder les flux de chaleur (phonons, polaritons...) à très petite échelle. Ces développements innovants concernent les sondes locales thermiques ultra-sensibles, les techniques couplées SNOM/TDTR, AFM/SThM/SEM. Enfin, les méthodes numériques nécessaires pour prédire les propriétés thermiques et thermodynamiques des nanomatériaux/nanosystèmes devront être adaptées ou développées comme les méthodes des fonctions de Green hors-équilibre, celles basées sur les premiers principes (DFT) et les méthodes de dynamique moléculaire étendues jusqu'aux basses températures.

APPLICATIONS À LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

La capacité à structurer la matière à différentes échelles de longueur ouvre la voie à beaucoup d'applications thermiques dans la gestion de l'énergie aux basses dimensions. La miniaturisation des capteurs hybridant parfois plusieurs sources d'énergie (thermoélectricité, photovoltaïque, piézoélectricité) ouvre la voie à de nouvelles applications comme avec des MEMS et NEMS thermiques. Des domaines tels que les objets connectés en général seront fortement impactés par ces innovations.

MATÉRIAUX

Par essence multidisciplinaire et à l'interface des domaines scientifiques, la science des matériaux est l'un des moteurs essentiels des développements de la recherche et de l'innovation. Ne se contentant pas de faire

émerger de nouveaux matériaux, concepts et propriétés, elle repousse sans cesse les limites.

LES MATÉRIAUX DE DEMAIN : DE LA SYNTHÈSE AU CONTRÔLE DES PROPRIÉTÉS

Nouveaux matériaux et hétérostructures : l'émergence de propriétés et concepts innovants est portée par le développement de nouveaux matériaux et hétérostructures. Ainsi les matériaux 2D de van der Waals, dichalcogénures de métaux de transition, semi-métaux de Dirac et Weyl, mais aussi les matériaux organiques et hybrides (pérovskites halogénées organique-inorganique), les matériaux 2D magnétiques ou antiferromagnétiques, les oxydes fonctionnels, les métamatériaux à base d'oxydes, etc. constituent les matériaux de demain. L'exploration de nouveaux alliages et composés, la possibilité d'induire des changements de phase et d'aller vers les matériaux quantiques ou de réorganiser la matière pour contrôler à volonté les propriétés, comme l'inclusion de nanoparticules dans les polymères reconfigurables, sont également l'ébauche des futures applications et composants.

Fonctionnalisation et hybridation : les nouveaux développements passent également par la fonctionnalisation et l'hybridation de matériaux dont nous maîtrisons la synthèse et connaissons les propriétés. Alors que la fonctionnalisation offre la possibilité d'ajuster les propriétés d'un matériau (phénomènes d'exaltation ou d'inhibition) en modifiant les surfaces via des procédés d'encapsulation/enrobage ou de décoration avec des nanoparticules, molécules biologiques ou chimiques ouvrant ainsi vers l'interdisciplinarité, l'hybridation quant à elle explore l'association de matériaux de nature et/ou de dimensionnalité différentes. L'hybridation 2D/2D, 2D/3D, 1D/1D, multi-matériaux (2D/oxydes, 2D/organiques, III-V/2D, III-V/oxydes, 2D/supraconducteurs, magnétiques/molécules chirales, etc.) va au-delà de la simple association puisqu'elle vise non pas à additionner des propriétés, mais à en faire émerger et en façonner de nouvelles.

Nouveaux procédés de synthèse et nouvelles approches : la recherche en science des matériaux s'accompagne de grands verrous scientifiques et technologiques. L'émergence de nouveaux procédés de synthèse et d'intégration des matériaux, plus ou moins matures, constitue une des premières clés de progrès. Grâce à des approches innovantes de fabrication et de structuration des surfaces par micro-nano-fabrication, sont à notre portée la maîtrise de l'empilement de plusieurs couches 2D de pérovskites, le développement d'architectures aujourd'hui difficilement réalisables comme l'intégration d'oxydes fabriqués par ALD en spintronique, l'intégration métal/semi-conducteur en 3D pour l'électronique, le développement de matériaux organiques sur mesure comme des élastomères électroactifs ou des électrodes extensibles, ou encore les nanostructures fonctionnelles magnétiques. Au développement de ces procédés s'associe désormais la nécessité d'une forte contribution de nouveaux moyens de synthèse, de caractérisation, d'as-

sistance, de prédiction et de simulation. C'est ainsi que face aux multiples combinaisons possibles de matériaux, comme dans les domaines des pérovskites, des oxydes, des dichalcogénures, etc., et à la quantité croissante de données, des outils intégrant l'intelligence artificielle sont désormais considérés, avec des enjeux d'apprentissage utilisant des modèles multiphysiques.

Verrous fondamentaux: tous ces nouveaux défis ne sauront être relevés sans une compréhension approfondie des phénomènes intervenants et contrôlant les propriétés des matériaux et hétérostructures comme c'est le cas dans les isolants topologiques et les métamatériaux. Le rôle des défauts et du désordre, du dopage et des impuretés, des contraintes dans les matériaux, la maîtrise des surfaces et interfaces ainsi que des phénomènes de migration qui y sont associés, la compréhension des instabilités ne sont que quelques exemples de verrous fondamentaux qu'il faut étudier pour maîtriser la reproductibilité des nouveaux matériaux et ainsi les porter vers un futur plus applicatif. Ici encore, seront indispensables le développement de nouvelles techniques de caractérisation, notamment multiphysiques, et le couplage expérience/théorie-simulation multi-échelle, ainsi que l'étude des matériaux en conditions de fonctionnement *in situ* et *operando*.

DÉVELOPPEMENT DE MATÉRIAUX SOUTENABLES

Matériaux non toxiques et abondants: afin de relever les grands défis sociétaux, il devient important d'innover pour favoriser l'émergence de nouveaux matériaux performants, durables et issus de matières premières abondantes, non toxiques et non nocives. Le remplacement du plomb dans les pérovskites est l'exemple le plus connu, mais on peut citer aussi l'utilisation de matériaux sources toxiques pour la synthèse des matériaux 2D ou encore les solvants nocifs dans les étapes de synthèse des pérovskites ou de l'électronique organique. Le développement de procédés les plus respectueux possibles de nos environnements et de notre santé, tout en présentant un bilan de consommation des ressources optimum au regard du besoin considéré, doit devenir un enjeu majeur pris en compte, et orienter les choix en termes de matériaux et procédés.

Intégration cycle de vie des matériaux: il est aujourd'hui nécessaire d'intégrer dans nos développements le cycle de vie des matériaux et procédés utilisés, considérant ainsi les notions de frugalité, soutenabilité, durabilité, recyclage, consommation énergétique et émission de dioxyde de carbone. Des choix technologiques doivent être considérés au regard de la disponibilité des matières premières tout comme de leur recyclage, sans pour autant devenir inefficaces. Le remplacement d'éléments toxiques doit être une voie privilégiée, s'inspirant de la production verte, de l'impact zéro déchet et de l'économie circulaire. Mais elle ne peut être la seule voie si aucune solution viable n'est trouvée. Dans ce cas, l'intégration des futures étapes de recyclage doit être im-

pérativement considérée dès les premières phases de développement.

Optimisation des technologies: l'empreinte carbone/gaz à effet de serre et les coûts énergétiques et environnementaux sont aujourd'hui des paramètres à intégrer dans nos stratégies de développement des matériaux. Aller vers des classes de matériaux plus performantes, favoriser une synthèse localisée où elle est strictement nécessaire et privilégier des techniques de synthèse plus efficaces et moins coûteuses en termes de rejet sont des stratégies à privilégier. Une méthodologie de contrôle des impacts au regard des matériaux et procédés utilisés ainsi que des objectifs scientifiques doit être discutée et intégrée à la démarche scientifique de demain.

MISE À L'ÉCHELLE : DU MONDE (SUB-) NANOMÉTRIQUE AUX GRANDES SURFACES

Scalabilité: les matériaux et leurs hétérostructures synthétisés aux petites dimensions, comme les matériaux 2D, les couches minces et nanoparticules, et les nanomatériaux présentent des propriétés remarquables. Mais pour que ceux-ci soient porteurs de perspectives en termes d'applications pour la nanoélectronique et la nanophotonique, leur croissance sur de larges surfaces doit être développée sans pour autant en altérer leurs propriétés. Pour cela, de nouvelles techniques et procédés de fabrication sont explorés comme l'évaporation sous vide ou la synthèse décorrélée des parties organiques et inorganiques des pérovskites, le graphène artificiel ou bien encore la mise en œuvre de systèmes désordonnés.

Réduction des échelles: structurer les matériaux aux très petites échelles permet d'en moduler ou d'en exalter les propriétés (en raison notamment du rôle prédominant des surfaces), voire d'en révéler de nouvelles, non atteignables aux plus grandes dimensions (cas de matériaux 2D). La nanostructuration ouvre ainsi la voie vers de nouveaux composés, de nouvelles fonctionnalités, de nouvelles stratégies pour l'hybridation ou l'intégration. Et, bien que les phénomènes s'exprimant à ces échelles nanométriques soient loin d'être pleinement explorés et maîtrisés, nous assistons à l'émergence de l'échelle sub-nanométrique avec le développement de structures atomiques et réseaux d'atomes artificiels. Cependant, tout ensemble intégrant des systèmes (sub-) nanométriques requiert une connaissance profonde des phénomènes mis en jeu en régissant les propriétés. Des verrous fondamentaux apparaissent, impliquant alors le développement de nouvelles techniques de nano-caractérisation et de nouveaux modèles de calculs. La quasi-inexistence de la modélisation de l'épitaxie des matériaux de van der Waals, pourtant si nécessaire au développement de cette activité, en est un bon exemple. Enfin, associé à ces verrous, il n'existe pas toujours de figures de mérite établies à ces échelles. Il est donc aujourd'hui essentiel de définir de nouveaux facteurs de qualité adaptés pour tendre vers une normalisation indispensable aux traitements de ces nouvelles échelles.

DESIGN INVERSE

Recherche fondamentale orientée par les applications: un apport essentiel de la recherche fondamentale réside dans la synthèse, l'architecturation et l'ingénierie contrôlée de matériaux porteurs de fonctions précises comme les oxydes fonctionnels pour la photonique, les nanomatériaux pour l'énergie, les matériaux antiferromagnétiques pour l'électronique ultra-rapide, etc. L'hybridation et l'intégration de matériaux aux propriétés différentes sont des voies à privilégier pour répondre à des besoins spécifiques orientés par les applications. Des verrous d'intégration multi-matériaux comme l'InP sur silicium ou le développement de couches de protection de TiO₂/III-V pour les applications de cellules électrochimiques exigent des investigations qui relèvent des aspects fondamentaux et nécessitent la mise au point de procédés ciblés. C'est ainsi que des questions fondamentales relatives au dopage, contacts, défauts, surfaces et interfaces, etc. redeviennent essentielles.

Multifonctionnalité: la coexistence de plusieurs matériaux aux fonctions distinctes dans un même système est aujourd'hui un prérequis au développement de composants plus efficaces, moins chers, moins volumineux. Cette co-intégration de fonctions multiples, comme le couplage de pérovskites avec le silicium pour la fabrication de cellules solaires tandem, de matériaux antiferroélectriques avec des phonons pour ajuster la vitesse de réponse dans les THz ou encore le développement d'interconnexions 3D alliant électronique et photonique implique de connaître les propriétés fondamentales de chacune des parties intégrées et d'en étudier les interactions croisées dans le but de garantir l'efficacité de chacune sans en altérer les autres. L'interdisciplinarité s'invite également dans les systèmes multifonctionnels, avec par exemple le développement de capteurs physiques pour la biologie. Dès les premières étapes de conception, des enjeux additionnels en termes de choix de matériaux et de technologie compatibles avec les applications apparaissent alors.

Développements technologiques et maturation: innover en termes de nouvelles méthodologies (fabrication additive, procédés en phase vapeur pour géométrie à haut rapport d'aspect, hybridation des techniques de synthèse), favoriser l'intégration multi-échelles (nanostructures organisées aux petites et grandes échelles), faire converger différentes technologies (technologies quantiques avec celles historiques à base de semi-conducteurs), intégrer le caractère pluridisciplinaire des besoins (micro-nanotechnologies et santé (optogénétique, neuroélectronique) ou environnement (capteurs tout autonomes) sont les prérequis pour répondre aux enjeux sociétaux. Mais ces développements technologiques, intégrant les besoins applicatifs et impliquant des matériaux de maturités diverses, ne seront pleinement atteints et transférables qu'à la condition d'études approfondies de leur durabilité, robustesse et de leurs mécanismes de vieillissement.

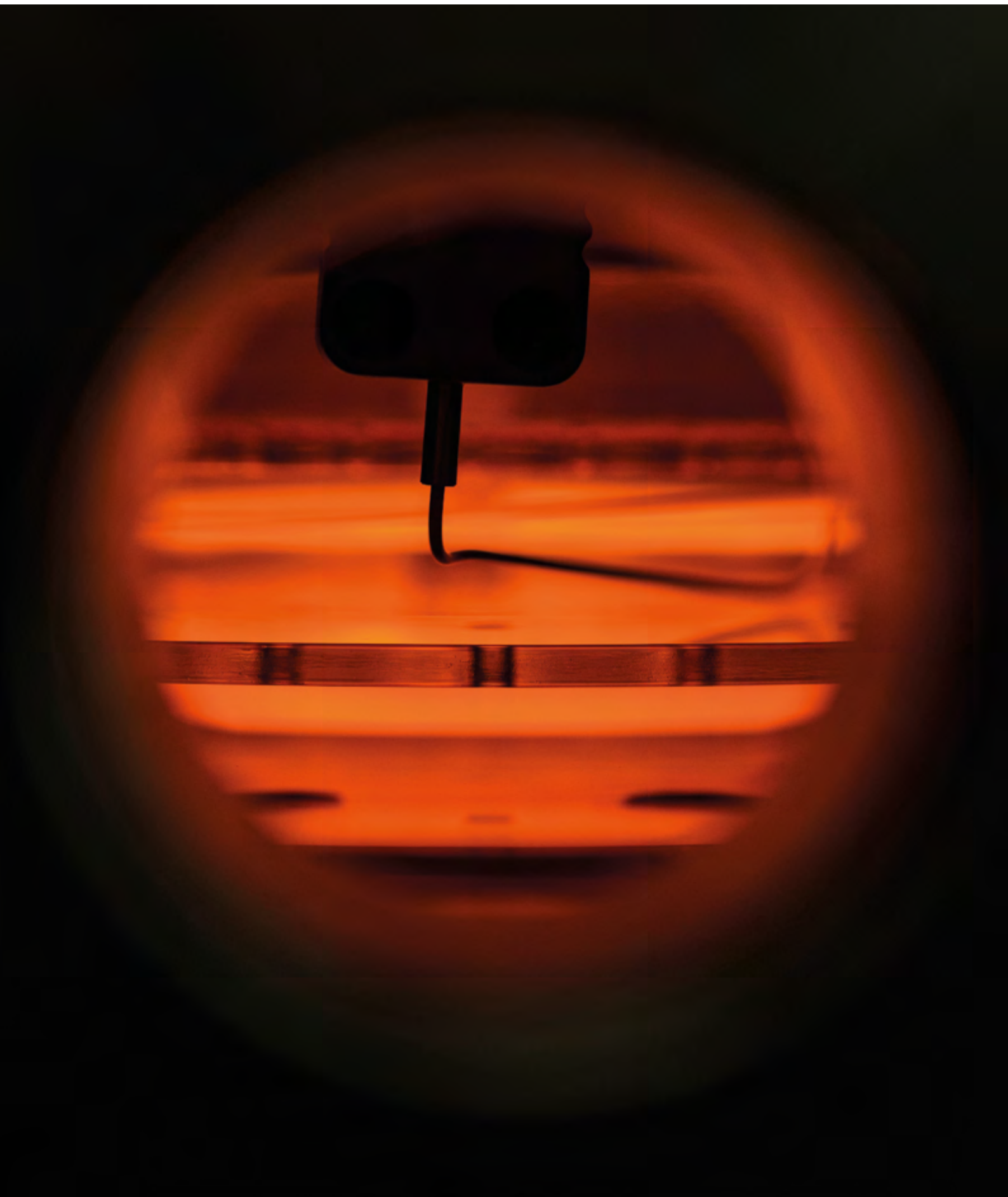
ENJEUX TRANSVERSES : NOUVELLES APPROCHES ET INSTRUMENTATION

NOUVELLE MÉTROLOGIE, INSTRUMENTS ET SONDES

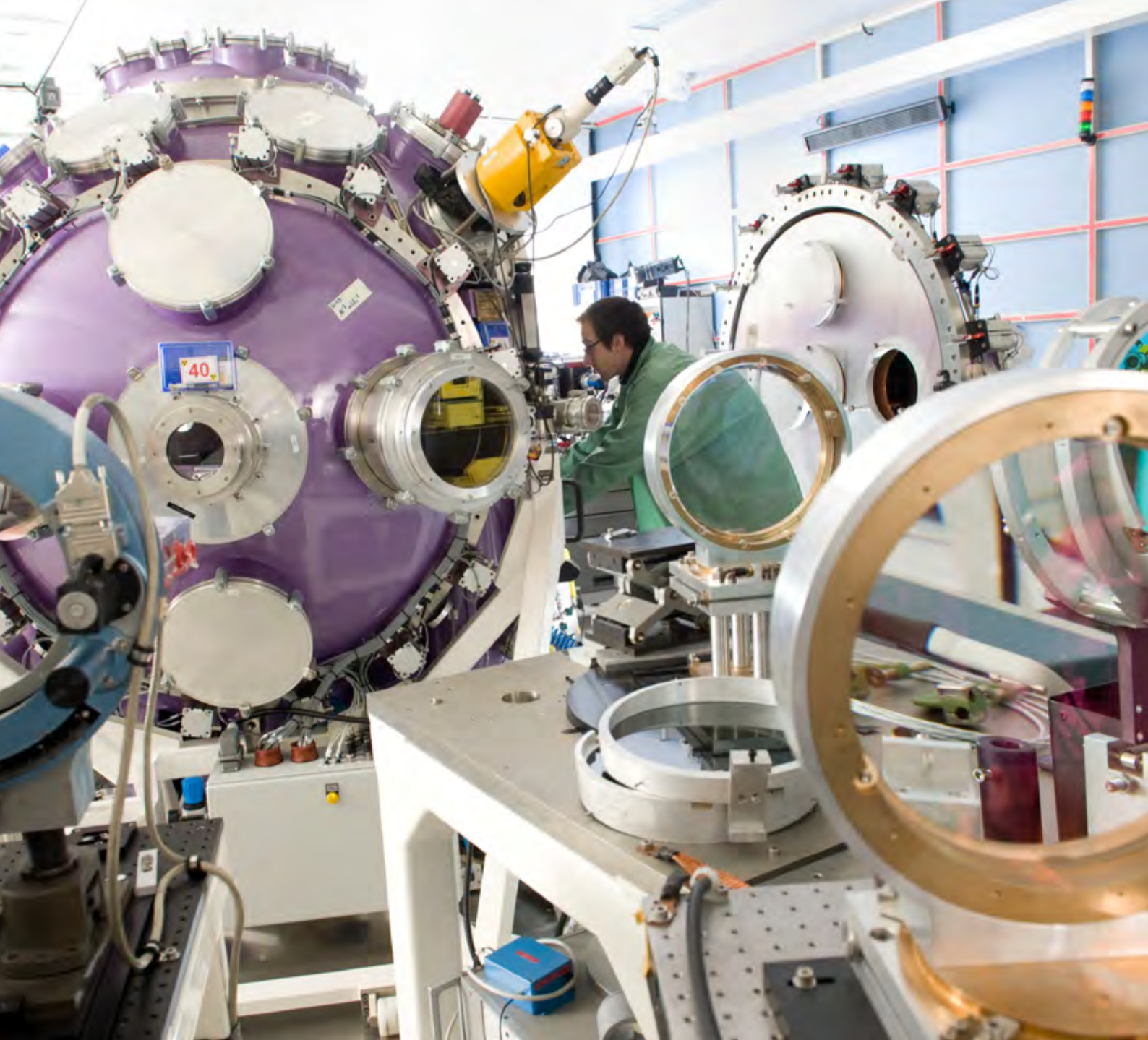
Les techniques expérimentales repoussent toujours plus loin les limites de sensibilité, de domaine spectral et de résolutions (temporelle, spatiale, angulaire, dans l'espace réciproque, et leur combinaison). L'instrumentation devient également plus polyvalente et associe dorénavant plusieurs mesures simultanées en fonction de multiples paramètres ou stimuli physiques. Elle se développe aussi *in situ* et *operando*. L'étude des matériaux 2D et des multiferroïques accélère d'ailleurs le développement des mesures multiphysiques, en fonction de la pression, de la température, des champs électriques et magnétiques, etc. Plus généralement, de nombreuses techniques sont amenées à se renforcer, parmi lesquelles la spectroscopie photoélectronique résolue en angle (ARPES) en régime hors équilibre, les magnétométries quantiques à centre coloré, le champ proche ultra-résolu spatialement grâce aux pointes/antennes plasmoniques, la spectroscopie Brillouin, les techniques de tomographie et de ptychographie, etc. De nouveaux instruments sont également attendus, tels que des sources solides continûment accordables au-delà de 1 THz, des générateurs d'impulsions picoseconde (au-delà de 100 GHz), ou encore des dispositifs mésoscopiques permettant de contrôler les interactions au niveau des particules individuelles. Ces efforts en instrumentation devront être conjoints et coordonnés entre instruments de laboratoire et IR* (par ex. nouveaux instruments couplés aux futures lignes de SOLEIL). Ces mesures ultimes, sur des matériaux et nano-objets dont la qualité est croissante, permettront sans nul doute de nombreuses avancées fondamentales.

DÉPLOIEMENT DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les algorithmes d'apprentissage automatique investissent rapidement le champ de la physique. Ils permettront d'accélérer la conception inverse de matériaux, dispositifs, systèmes, de même que la co-conception des couches physiques et de traitement du signal de plus en plus intégrées. L'intelligence artificielle (IA) est attendue pour la conception et le pilotage en temps réel des expériences. À plus long terme, il s'agira d'interfacer l'IA avec différents modèles physiques dans le but de voir prédire un modèle sur la base de résultats d'expériences, ou lorsque la donnée n'est pas accessible à l'expérience. Ceci pose des questions: quelle performance de l'IA pour évaluer la certitude des résultats produits, s'adapter à des situations proches, mais différentes, déterminer la faisabilité expérimentale des prédictions?



Croissance de graphène sur un substrat métallique, à 1050 °C. © Cyril FRESILLON / C2N / CNRS Images



Vue générale de la salle d'expérience et de la chambre d'interaction «Milka» de l'installation LULI2. © Jean-Claude MOSCHETTI / CNRS Images

Physique en régimes extrêmes

RÉSUMÉ

Les régimes extrêmes sont un outil puissant de compréhension de la matière, un terrain propice aux découvertes, le catalyseur d'applications technologiques ainsi qu'un formidable défi intellectuel et technique.

Dans la prochaine décennie, les phénomènes ultrarapides (picoseconde à attoseconde) seront à même de sonder les échelles spatiales du nm — voire les objets nanométriques uniques — tout en gardant une sensibilité quantique aux relaxations des quasi-particules. L'enjeu pour 2030 est de contrôler de manière cohérente les propriétés de la matière via des impulsions multiples exerçant en multi-échelles (notamment au THz non-linéaire).

Trois axes se dégagent dans le domaine de la cryogénie : les plus basses températures aideront à repousser les frontières de la connaissance (fluides quantiques, résonateurs électromécaniques, interaction électron-noyau, etc.), l'association à d'autres conditions extrêmes se généralisera pour comprendre les matériaux quantiques et de nouvelles plateformes visant des puissances frigorifiques extrêmes émergeront pour l'ordinateur quantique (et toute l'ingénierie associée).

Les progrès des dispositifs continus et pulsés de champs magnétiques intenses bénéficieront à l'astrophysique de laboratoire, la magnétohydrodynamique ou la magnétoscience. Couplés à d'autres variables extrêmes et/ou à des sondes de plus en plus sophistiquées (images optiques, microscopies de champ proche, électronique haute fréquence, techniques ultra-rapides), ces progrès impacteront fortement la recherche sur les matériaux quantiques. Les nouvelles bobines en supraconducteurs à haute température promettent de réduire le volume des tokamaks pour la fusion thermonucléaire, mais permettront aussi des expériences novatrices à temps de comptage très long en matière condensée ou en physique des particules (recherche de matière noire notamment).

La physique des lasers intenses promet de nombreuses évolutions à l'horizon 2030. Grâce à l'installation laser femtoseconde Apollon, fiabilisée, poussée jusqu'à des puissances crête de 10 PW et couplée à de nouveaux types d'accélérateurs, les processus fondamentaux de l'électrodynamique quantique comme la création de paires électrons-positons ou d'autres particules/interactions dans le vide pourront être étudiés expérimentalement et être confrontés aux différentes théories de strong field

quantum electrodynamics. Associer des lasers de haute énergie dont la durée d'impulsion est plus longue (> 1 kJ-ns) à des diagnostics innovants (souvent produits à partir de sources issues d'Apollon, des XFEL, des synchrotrons ou par des lasers de haute énergie) permettra d'étudier les chocs radiatifs et les processus d'accrétion et d'éjection propres à l'astrophysique-plasma mais aussi en physique des très hautes pressions (> 10 Mbar) à des températures de l'ordre de 10 000 K. Cela donnera accès à l'étude des matériaux des intérieurs exo-planétaires ou des propriétés remarquables de la matière dans des domaines encore inexplorés. À plus basse température, les hautes pressions resteront l'apanage des enclumes de diamant, qui seront de plus en plus associées à des diagnostics performants (XFEL, synchrotrons, etc.). Les installations laser de très haute puissance seront aussi un outil privilégié pour explorer et fiabiliser de nouveaux accélérateurs de particules (électrons/ions/neutrons) et sources de rayonnement compactes avec des propriétés uniques, pouvant notamment être utilisés dans des installations laser hybrides combinant 10 PW-fs et 10 kJ-ns. Pour la fusion (par confinement magnétique, FCM, ou inertiel, FCI), des progrès viendront notamment du développement de nouveaux diagnostics, entre autres pour comprendre les conditions des interactions aux bords (FCM), l'absorption anormale (FCI) ou les instabilités hydrodynamiques et les turbulences.

Physique en régimes extrêmes

QU'EST-CE QUI EST EXTRÊME ?

Si presque toute recherche en physique peut revendiquer une dimension extrême (e.g. sensibilité des mesures, capacités de calculs), nous nous concentrons ici sur les conditions extrêmes de température, de champ magnétique et électrique, de pression et de résolution temporelle, impliquant en général des moyens expérimentaux conséquents, mais non spécifiques à un sujet de recherche. Ainsi, la physique des atomes froids, discutée dans d'autres ateliers, n'est pas reprise ici. Certains grands instruments (bobines de champ magnétique, lasers de puissance ou à électrons libres) produisent de façon évidente des conditions extrêmes. Ces régimes extrêmes recouvrent une multitude de domaines de la physique avec des motivations et des pratiques très diverses. L'extrême qui est bien sûr consubstantiel aux plasmas peut aussi contribuer à révéler des phénomènes inédits (e.g. phénomènes hors-équilibre ou nouveaux états électroniques), à élucider les propriétés complexes de matériaux quantiques ou à reproduire en laboratoire des phénomènes géophysiques ou astrophysiques. Dans nombre de cas, l'extrême résulte de la combinaison de plusieurs paramètres.

PHÉNOMÈNES ULTRARAPIDES (PS À AS) OU LA PHYSIQUE HORS-ÉQUILIBRE (HEQ)

Résoudre temporellement les changements structuraux et électroniques, les échanges d'énergie ou les mouvements mécaniques dans la matière HEQ, a deux objectifs entremêlés : comprendre les propriétés d'une matière HEQ et contrôler son évolution sur les temps caractéristiques des couplages entre les degrés de liberté (électron, phonon, polaron, magnon, etc.). Le point clef est l'utilisation d'un stimulus de durée plus courte que ces temps de couplage, afin d'assurer une mise en phase des dynamiques des (quasi) particules excitées : on parle alors de dynamique cohérente, à même d'engendrer aux échelles macroscopiques des modulations ou changements ultra-rapides des propriétés physiques. Les phénomènes ultra-rapides, allant de l'attoseconde (as) à la picoseconde (ps), apparaissent donc dans une multitude d'objets d'étude. Les détections les plus sensibles sont étendues au domaine temporel en combinant plusieurs impulsions lumineuses ultracourtes (le plus souvent < 100 fs) : les impulsions pompe amenant le système HEQ et les impulsions sonde permettant de caractériser cette matière après un délai variable. Ces expériences pompe-sonde résolues en temps (EPSRT) révèlent les cohérences

et leurs déphasages ou pertes par couplage (relaxation d'énergies, transfert de populations, sous-systèmes). Les EPSRT dépendent des innovations en sources de lumière (durée/taux de répétition/flux/gamme spectrale/polarisation/moment angulaire orbital) développées au sein des laboratoires, mais aussi de grands instruments (XFEL/ELI/synchrotrons). Les objets d'étude sont très divers : des nano objets uniques, des matériaux 2D, interfaces ou protéines.

- **La spectroscopie THz** fait la jonction entre l'optique (> 10 THz) et l'électronique (< 0.1 THz). L'émission THz (e.g. déclenchée optiquement) ou l'excitation par un champ THz pulsé donnent accès de manière unique aux dynamiques des particules et processus de basse énergie dans les solides (phonons, plasmons, polaritons, spin, magnons, conversion spin-charge...). Ce faible quantum d'énergie THz (quelques meV) permet de sonder ou d'agir directement sur les interactions avoisinant le niveau de Fermi. Par exemple, l'excitation résonante de magnons dans les isolants reste un enjeu pour une spintronique sans effet Joule. **Les sources THz intenses à développer** (> 100 kV/cm) permettraient le contrôle et l'exploration de nouveaux états dont la physique sous-jacente est encore peu comprise : phononique non-linéaire (PNL) dans des matériaux polaires, ferroïques et multiferroïques (incluant les changements de phase structuraux ou la création de brisures de symétrie) et PNL pour la manipulation des états supraconducteurs et des systèmes quantiques 2D comme les hétérostructures pour exciter des phonons sélectivement — en polarisation et en fréquence — et ce simultanément à une photoexcitation électronique. Les impulsions THz intenses permettent aussi d'explorer les non-linéarités et la génération d'harmoniques dans les matériaux quantiques. Tout ceci nécessite des développements de THz intenses de plus haute cadence, plus sensibles et présentant un meilleur contrôle spectral. Développer des optiques pour manipuler les moments angulaires de spin et orbital des faisceaux pulsés THz permettrait d'étudier la chiralité et les échanges de moments angulaires.

- **EPSRT dans les hétérostructures** : En photonique, comme en photocatalyse, suite à la photoexcitation, l'objectif est la séparation spatiale ultrarapide des charges (électron/trou) pour limiter la ré-émission de lumière et ainsi augmenter la migration de charges (cellules solaires ou production de H_2). Les EPSRT à base par exemple de STM, ARPES, EELS, TEM seraient donc à privilégier pour suivre et optimiser cette migration dans des hété-

rostructures hybrides-2D où de nouveaux couplages spin-vallée émergent aux interfaces, caractérisées par des désaccords de maille, de nouveaux écrantages électroniques et effets de confinement. Les outils à développer sont des détecteurs optiques 2D ultra sensibles/rapides (ps) à des rayonnements de longueur d'onde supérieure à 1.5 μm , ainsi que des échantillons encapsulés de grandes dimensions ($>100\ \mu\text{m}$). Ces développements seront des atouts pour étudier dynamiquement le rôle de la symétrie cristalline, des défauts et leurs implantations à façon dans ces nouvelles hétérostructures de feuillets de van der Waals. Un réel défi émerge pour réaliser des excitations sélectives, sur états topologiques, ou sur matériaux 2D neuromorphiques par THz intense.

- **Femtomagnétisme**: Après 30 ans d'étude, il subsiste toujours des zones d'ombres sur les processus sous-jacents au femtomagnétisme. Grâce à l'élaboration d'hétérostructures maîtrisée à l'échelle atomique, une électronique de spin ultrarapide ($\sim 100\ \text{fs}$) est en plein développement. Les besoins de caractérisation préalable des propriétés magnétiques de ces échantillons et de couplage d'EPSRT pour accéder aux multi-échelles spatiales deviennent cruciaux. Progresser exige des caractérisations structurales, électroniques et magnétiques ultra-rapides. Les EPSRT de STM, ARPES-X résolu en spin et XMCD, notamment aux seuils L et M des métaux de transitions et terres rares, des détecteurs 2D ultra-rapides, mais aussi l'élaboration de **nouvelles hétérostructures aux interfaces optimisées**, faciliteront la compréhension des états transitoires magnétiques liés aux couplages électron-phonon/champ cristallin-magnon/spin-orbite. Ces développements permettront d'aborder l'**attomagnétisme**. L'excitation en X mous ou XUV des électrons de fortes corrélations magnétiques, ou encore l'holographie X résolue en temps sont aussi envisagées. Le développement des EPSRT sur synchrotrons-ps et l'European-XFEL permettra une systématisation de ces études du magnétisme dynamique.

- **EPSRT dans les matériaux**: L'étude des dynamiques fs-ps dans les matériaux trouve un bain de jouvence avec les sources XFEL. Très intense, cette sonde permet par diffraction X cohérente de visualiser l'évolution temporelle de corrélation d'ordre local. Les stations expérimentales convergent vers une fiabilisation et un niveau de maturation bienvenus avec des détecteurs couplés (absorption, émission, diffraction), donnant simultanément accès aux dynamiques de transfert de charge (XAS), aux états d'oxydation, aux états de spin (XES) et à leur couplage avec la relaxation structurale (EXAFS & XRD). Ces sources vont évoluer vers les très hautes énergies (70-100 keV) pour sonder des matériaux plus denses. Les principales avancées récentes concernent les transitions photoinduites de magnétisme, les effets photostrictifs et leur lien avec la polarisation dans les multiferroïques, les transitions de phase photoinduites affectant les propriétés de transport, mais aussi les dynamiques de transition de phase, de microstructure et plasticité, de dissociation et dismutation **en sollicitations ultra-rapides de pres-**

sions et de températures extrêmes. Les systèmes se révèlent être inhomogènes spatialement de par la présence de domaines polaires/magnétiques ou la coexistence de phases présentant des ordres électroniques distincts. Ainsi, la résolution spatio-temporelle des sources de rayons X (aujourd'hui $\mu\text{m}/\text{fs}$) devra tendre vers le **nm/fs**. Une nouvelle ingénierie des domaines est possible via l'étude dynamique des déformations structurales et électroniques *in situ* avec de possibles couplages/écrantages entre électron, spin, phonon, pour modifier les propriétés. L'idée est d'**agir sur les matériaux en temps réel (fs-ps) avec un contrôle par un THz non-linéaire** et un suivi par une EPSRT optique/rayons X. On pourrait ainsi visualiser l'importance des symétries locales ou encore des modes polaires, ou simplement libérer l'énergie en pressurant les phonons pertinents. Les nouvelles sources et détecteurs associés permettront de déterminer les conditions HEQ pertinentes des diagrammes de phase à l'équilibre et d'explorer **les diagrammes de phase dits dynamiques**. En s'appuyant sur ces dynamiques microscopiques, l'enjeu majeur est de traiter des problématiques multi-échelles spatiales et temporelles: des propriétés durables des matériaux peuvent-elles être produites en exploitant leurs propriétés physiques ultra-rapides et microscopiques?

- **En plasmonique ultrarapide**, les enjeux sont de différents ordres. La dynamique de la réponse optique de nano-objets complexes (en composition, forme, assemblage, organisation spatiale) et/ou constitués de nouveaux matériaux plasmoniques (thermochromes à phase métallique, oxyde d'indium et d'étain — ITO, nitrure de titane — TiN, graphène...), présentant des modes plasmon localisés sur des plages spectrales au-delà du visible, est encore mal connue. Par ailleurs, des impulsions $<10\ \text{fs}$ permettraient de mieux appréhender les propriétés d'un gaz d'électrons chauds HEQ et de **mieux comprendre les couplages de ces nano-objets avec leur environnement**. Le champ proche exalté fournit en effet une signature ultrarapide de l'environnement direct des nano-objets: gradient de température, état d'oxydation, présence d'autres objets, transfert électronique. Les échanges d'énergie aux interfaces alors induits font de la dynamique optique des nano-objets plasmoniques une sonde permettant d'accéder simultanément aux propriétés mécaniques, optiques et thermiques à l'échelle du nm, dont la compréhension est encore incomplète. Cette dynamique ouvre des perspectives originales pour la conception de nouveaux capteurs rapides à interrogation optique. La sensibilité des modes plasmons et de leur dynamique à un grand nombre de paramètres (morphologie et nature des nano-objets, caractéristiques de la lumière) offre autant de degrés de liberté pour optimiser cette détection. Les couplages entre nano-objets plasmoniques et leur environnement pourront aussi être explorés en EPSRT de TEM/PEEM ou encore de XRD. Les questions encore ouvertes à ce jour, sont **le couplage spin-plasmon et les aspects cohérents ($<5\ \text{fs}$)** de l'oscillation collective électronique à la résonance.

- **La photobiologie ultrarapide** cherche à comprendre le fonctionnement intime du vivant, mais elle est aussi une inspiration continuelle pour l'élaboration de (nano) matériaux synthétiques à la photoréactivité exacerbée pour la photo-catalyse, les photo-moteurs moléculaires, l'optogénétique ou encore la bioimagerie. Les EPSRT-optiques y sont développées pour révéler les transferts d'énergie/signal électronique ou vibrationnels d'un chromophore niché au sein de biomacromolécules vers l'échafaudage protéique puis vers l'environnement, tandis que la C-RT en X sur des microcristaux permet de visualiser les changements structuraux cohérents. **Une approche multimodale (optique-RT, C-RT en X, théorie) de résolutions fs/nm sur des biomolécules uniques dans leur milieu naturel**, permettrait de comprendre la complexité des multiples étapes qui sous-tendent cette photoréactivité, pour mieux aborder la globalité des réactions biochimiques, y compris des réactions non-photodéclenchables. Des axes souhaitables sont le développement de plateformes multi-échelle pour l'étude *in vitro* et *in vivo* des cohérences et coopérativités menant aux fonctionnalités biologiques, le suivi spatial de H/H⁺ au sein des macromolécules, et la prédiction de mutations de protéines permettant de contrôler leur photoréactivité.

- **Les microscopes en transmission ultrarapide (UTEM, <400 fs)** en développement vont s'ouvrir progressivement aux utilisateurs. Ces instruments uniques combinent **les échelles nm et fs** pour résoudre spatialement presque toutes les dynamiques discutées ci-dessus. Leur atout est leur capacité à sonder directement plusieurs degrés de liberté en combinant les différentes techniques disponibles sur le même instrument (imagerie, diffraction, spectroscopie, holographie). Du fait du faible nombre d'électrons sonde disponibles, les efforts actuels se focalisent sur la mise en œuvre de (I) détection plus efficace (caméra à détection directe) des quelques électrons sonde de 100-300 keV, (II) optimisation du signal (acquisition de piles d'images, réalignement post-acquisition), et (III) stabilisation active des faisceaux électroniques permettant d'accroître significativement les durées d'acquisition pour atteindre l'heure. Ces améliorations ouvriront la voie à l'imagerie, la diffraction et l'holographie électronique-RT ainsi qu'à la détection de l'émission de lumière dans le microscope électronique (cathodoluminescence RT). Ainsi, explorer l'évolution temporelle des propriétés chimiques, électroniques, mécaniques, magnétiques de nano-objets ou d'interfaces, et cartographier les champs magnétiques et électriques générés dans les échantillons sera possible. L'autre axe de développement est la mise en forme spatiale et temporelle de ces impulsions électroniques fs en faisant interagir les sondes électroniques avec un faisceau laser mis en forme. Une perspective de ces techniques est la **génération d'impulsions électroniques as dans un UTEM**.

Les tomographes atomiques par émission de matière seront poussés pour sonder la matière en quantité extrêmement faible (ppm) par évaporation laser avec des impulsions fs-UV-XUV-THz dissociant efficacement les

fragments moléculaires. Une analyse chimique tridimensionnelle structurale **subnanométrique**, capable de détecter des traces d'élément, est alors possible.

- **Les EPSRT de phase diluée** explorent à l'échelle moléculaire comment les dynamiques peuvent être contrôlées par les champs électriques oscillant d'impulsions fs dans une large gamme de moments angulaires et longueurs d'onde. Des révolutions technologiques (capteurs, GPU, IA...) permettent d'aborder des problématiques plus complexes comme les dynamiques d'interférences, d'enchevêtrements et corrélations quantiques, ou de contrôle cohérent. Les sources laser intense à base de titane-saphir (0.1-10 kHz) seront complétées par **les sources fibrées de plus hautes cadences (30 kHz-2 MHz)**, à base d'ytterbium de défaut quantique plus faible, pour augmenter drastiquement la puissance moyenne émise. Cette haute cadence ouvre vers **des EPSRT multi-paramétrées** en phase diluée, comme la spectroscopie 2D-UV sensible aux cohérences en sus des populations. Ces développements permettent une interdisciplinarité accrue sur des thématiques d'astrochimie, de chimie, de biologie ou de matériaux, en étudiant sous forme diluée des agrégats, des complexes chimiques, des nanograins isolés et des microjets liquides. L'objectif est toujours de comprendre les premières étapes de photoconversion de l'énergie. **Les expériences aux échelles as** (échelle des temps des dynamiques électroniques à l'ångström) ont marqué les 15 dernières années. Grâce à ces lasers haute-cadence fibrés, les sources as stables entre de 30-300 eV devraient devenir commercialisables pour la caractérisation X-RT et seront **combinées aux grands instruments comme les XFEL**. Enfin, les spectroscopies as seront déployées pour manipuler les propriétés électroniques, à **l'échelle du cycle optique**, créer des états quantiques de la lumière et de la matière ou encore observer et contrôler des transitions de phase.

La compréhension de toutes ces signatures temporelles requiert le développement d'approches phénoménologiques et de calculs mésoscopiques de plus en plus performants. Transversalement à ces diverses EPSRT, les supports théoriques décrivant les dynamiques HEQ couplant les degrés de libertés électroniques et structuraux, activées de manière cohérente ou incohérente dans des interfaces et hétérostructures doivent encore être fortement renforcés.

LES IONS MULTICHARGÉS

Les ions multichargés et/ou de hautes énergies soumettent la matière à des champs EM > 10¹² V/m et < 10 as. **Pour les interactions en milieux dilués** (molécules, agrégats, nanoparticules), les questions sont : qu'apprend-on des collisions ion-ion quand la perte d'énergie des ions est maximale? Contrôler le nombre d'électrons sur chacun des partenaires de la collision permettra de cartographier la dynamique quantique à *N*-corps de ce régime de collision. Comment approfondir notre connaissance sur la stabilité et la dynamique de fragmentation après ex-

citation/ionisation induite par des ions de vitesses allant de quelques dixièmes à quelques unités atomiques? Les agrégats moléculaires une fois ionisés et excités peuvent être le siège d'une certaine réactivité. Quelles sont alors les nouvelles espèces moléculaires? **En matière dense**, l'effet du champ extrême, induit par le passage du projectile, conduit à des mécanismes inédits de dynamiques atomiques et à une typologie d'endommagement unique par traces d'ions lourds. Ce type d'irradiation (incluant des irradiations multifaisceaux) a des applications multiples (hadronthérapie, astrochimie, industrie nucléaire, électronique, nanotechnologies, FCI...). Pour mieux cerner les dynamiques de ces traces atomiques, une vraie rupture expérimentale est nécessaire par exemple par **des approches de type EPSRT**. Comment élargir l'utilisation des ions pour contrôler ou sonder la matière? Le développement de **nano/micro faisceaux** pour les **techniques d'analyse ou de gravure** et la meilleure compréhension des **mécanismes de création de défauts** ouvriront la voie à la synthèse de matériaux aux propriétés nano-contrôlées.

PHYSIQUE ATOMIQUE DES PLASMAS

La physique atomique des plasmas décrit des processus élémentaires qui permettent à la fois de comprendre les propriétés du plasma, mais surtout d'interpréter des observables en termes de paramètres utiles (densité, température, champs EM). Ces données atomiques sont évidemment essentielles en astrophysique. Pour les plasmas issus des expériences menées auprès des grands instruments (e.g. FCM, FCI, XFEL, lasers de puissance), elles conditionnent à la fois la conception de diagnostics spectroscopiques judicieux et la pertinence de simulations numériques souvent lourdes. En appui aux développements en cours et pour pousser vers des conditions encore plus extrêmes, la communauté fait face à des configurations inédites et encore peu explorées. En particulier, l'évaluation correcte de l'émissivité des plasmas de numéro atomique Z élevé pour optimiser la conversion du rayonnement X dans les cavités (aux parois) **en FCI** et pour contrôler les pertes radiatives dans les Tokamaks **en FCM** (tungstène) est cruciale. La présence de champs magnétiques intenses dans les plasmas astrophysiques (Soleil, naines blanches) et dans les plasmas de laboratoire (FCM et FCI, Z-machine) apporte de nouveaux défis dans la modélisation de leurs propriétés radiatives. Pour le calcul de spectres synthétiques en fort champ magnétique et dans les conditions en haute densité d'énergie, ces investigations nécessitent le développement cohérent de modèles de cinétique des populations, d'hydrodynamique, de physique atomique et de profil de raies, couplés à des modèles de transfert radiatif. Ces études doivent pouvoir se dérouler en parallèle d'expériences ayant des résolutions spatiales et temporelles élevées, et sur des plateformes dédiées à la validation de ces modèles. Pour la matière dense et chaude, la pertinence des méthodes combinant dynamique moléculaire quantique et théorie de la fonctionnelle densité est discutable de par leur vision «matière

condensée» et basse température, qui voit les électrons comme un gaz de Fermi-Dirac sur des cœurs ioniques gelés. Avec la température, ces cœurs ioniques devraient déployer toute la complexité de leur structure atomique. De manière plus générale, **le problème de la structure atomique est un problème à N -corps loin d'être clos** pour les atomes neutres ou faiblement ionisés où le problème des corrélations entre les électrons peut être très important. Les tables de données spectroscopiques utilisées en astrophysique, dans le X-XUV et LIBS, sont loin d'être complètes voire fiables.

SOURCES ET ACCÉLÉRATEURS PLASMA

Les plasmas sont des outils formidables pour développer de nouveaux types d'accélérateurs et de nouvelles sources de rayonnements ou de particules avec des propriétés uniques, notamment des champs accélérateurs extrêmes surpassant de plusieurs ordres de grandeur ceux des accélérateurs radiofréquences. La physique de ces sources et accélérateurs va de l'interaction d'impulsions laser ou de faisceaux de particules avec des plasmas sous-denses (cible gazeuse) pour les électrons, positrons et la génération de rayons X et gamma via bêtatron et Compton, jusqu'à l'interaction laser-plasma sur cible solide pour les ions, électrons, neutrons et la génération d'harmoniques et d'impulsions attosecondes intenses sur miroir plasma. Cette physique implique généralement des intensités laser très élevées, au-delà de 10^{18} W/cm². Cinq familles d'applications potentielles structurent cette recherche: **les applications sociétales et médicales** (e.g. imagerie, radiothérapie flash, radiographie industrielle), **les FEL**, **la QED en champ fort** (voir ci-dessous), **la physique des hautes énergies** (collisionneur de particules) et **les applications scientifiques** (physique nucléaire en condition plasma, astrophysique de laboratoire, expériences pompe as - sonde as, physique atomique en champs extrêmes et ultra-courts, interaction laser-plasma, matière dense et tiède HEQ). Les premières preuves de FEL basés sur l'accélération plasma en 2020 sont un tournant qui annonce des développements majeurs pour (I) descendre en longueur d'onde (de 27 nm à moins d'un nanomètre); (II) atteindre la saturation du FEL; et même (III) implémenter des techniques avancées permettant le contrôle de la cohérence du rayonnement produit. Ce développement de FEL plasma devra être couplé à des progrès sur l'accélération plasma pour atteindre des **brillances et des qualités extrêmes**, de **fortes charges**, de **hautes énergies**, et une **fiabilité accrue**.

Les avancées dans ce domaine ont déjà permis de comprendre les mécanismes sous-jacents à ces sources, mais les problèmes restant à résoudre vont ouvrir des axes de recherche à l'horizon 2030. Un exemple emblématique est la perspective d'application à un collisionneur: l'accélération d'**anti-particules** dans un plasma est-elle possible et compatible avec les prérequis d'un collisionneur? Peut-on contrôler les instabilités qui peuvent apparaître à des efficacités énergétiques et des qualités élevées? Peut-on réaliser un accélérateur **multi-étage** sans com-

promettre la qualité du faisceau? Le potentiel applicatif **des ions et des neutrons entrerait dans une nouvelle dimension en s'approchant du GeV** et des jets relativistes. Il reste encore à explorer le passage à un régime d'accélération par pression de rayonnement (attendu à ces énergies relativistes), et à élucider les conditions d'existence de régime d'accélération mixte. Avec nos systèmes laser les plus puissants, **quelles intensités extrêmes peut-on générer avec un miroir plasma** par refocalisation des harmoniques et compression temporelle, et **quelle énergie d'électrons peut-on obtenir sur un seul étage** en dépassant les limites dites de diffraction et de déphasage de l'accélérateur laser-plasma? Ces questions sont fondamentales pour comprendre dans quelle mesure ces systèmes laser, sources et accélérateurs pourront répondre aux besoins de l'application QED en champ fort. À ces questions de physique s'ajoutent des questions d'autres natures : les systèmes laser pourront-ils monter en cadence et en puissance moyenne pour satisfaire les besoins de ces applications? À quel gain peut-on s'attendre en déployant des approches d'ingénierie et d'IA pour améliorer le contrôle, la stabilité et les performances? À ce titre, **la R&D laser reste une priorité**, en partenariat avec les industriels, notamment en explorant d'autres technologies (Yb:YAG, OPCPA, post-compression). Les forces françaises en **haute cadence** laser (e.g. projet LAPLACE) doivent permettre le développement pionnier d'approches IA pour les sources et accélérateurs plasma. Enfin, on peut esquisser quelques frontières particulièrement importantes pour 2030 : s'approcher du GeV pour les ions et les neutrons, dépasser les 10 GeV pour les électrons, démontrer une intensification par plusieurs ordres de grandeur par miroir plasma, obtenir des brillances de faisceau surpassant largement celles des sources et accélérateurs conventionnels. De telles avancées auront un impact majeur en ouvrant largement le champ applicatif, tout particulièrement pour l'astrophysique de laboratoire, la QED et le FEL.

Pour atteindre de tels objectifs, les efforts de recherche doivent s'accompagner de développements instrumentaux. Un besoin commun à la plupart des approches est le développement de **cibles avancées**, en se dotant de la capacité de produire de telles cibles à des coûts abordables. Sur les systèmes laser, la première priorité pour être en mesure d'exploiter à leur plein potentiel nos installations est la fiabilisation et la montée en qualité, en métrologie laser, en diagnostics et en fonctionnalités. Un défi majeur sera notamment de garantir un contraste suffisant tout en augmentant les éclaircissements laser sur cible solide.

Transverse à toutes les approches de sources et accélérateurs plasma est l'articulation entre physique et ingénierie, et entre expérience et théorie/simulations. Sans s'opposer à l'approche physique discutée ci-dessus, l'aspect **ingénierie** va monter en puissance (e.g. projet PALLAS), pour transformer des preuves de principe en prototype, voire en machine accessible aux utilisateurs, ce qui est au cœur du projet européen EuPRAXIA. La

démonstration d'une application des sources et accélérateurs plasma à son plein potentiel, au-delà de la preuve de principe et en dehors du domaine plasma, est un objectif prioritaire pour 2030 afin de valider le potentiel de ce champ thématique.

ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN CHAMP FORT

Le domaine de l'électrodynamique quantique (QED) en champ fort (SFQED) caractérisé de manière générale par l'interaction entre des champs EM ultra intenses (dits « forts ») et des photons ou de la matière (particules chargées, cible plasma), est en plein essor grâce aux nouvelles installations expérimentales laser de classe ≥ 10 PW-fs (telles qu'Apollon), et parfois combinées avec des accélérateurs de particules. Ce régime peu étudié en laboratoire associe simultanément des processus relativistes et quantiques, tous cruciaux pour comprendre fondamentalement l'interaction matière-rayonnement. Grâce à ces nouvelles installations laser, des phénomènes exotiques sont attendus, notamment la création de paires électron/positron, la non-linéarité du vide et la création de matière et d'antimatière dans le vide à partir de photons seuls. Ces phénomènes, prédits théoriquement, sont invoqués pour expliquer le comportement de certains objets astrophysiques méconnus.

Grâce aux moyens de simulations plus performants et aux nouvelles installations, la SFQED possède un fort potentiel de résultats pionniers. Elle pourra tirer profit des méthodes de physique de hautes énergies et de physique des plasmas pour décrire des phénomènes astrophysiques, mais aussi la génération de photons très énergétiques ou de faisceaux de particules inhabituelles. Un des défis principaux est de développer des schémas **s'approchant du champ de Schwinger** (champ seuil des effets SFQED) avec des installations disponibles en combinaison des sources laser, de particules et/ou de rayonnement secondaire (suite à l'interaction entre laser et plasma, laser et faisceau d'électrons, faisceau d'électrons et plasma, harmoniques focalisées, etc.). Ces études pourraient se concentrer sur la génération de photons gamma de très haute énergie et la création de paires électron/positron avec des effets de cascade et/ou avalanche selon le régime de champ électromagnétique accessible par les lasers dépassant les 10 PW-fs. La création d'un plasma de paires et l'étude de son comportement seront en lien très fort avec l'astrophysique et la création de champs magnétiques intenses. Du point de vue théorique, la description des régimes de SFQED non perturbatifs pour des champs allant bien au-delà du champ de Schwinger s'annonce comme un nouveau régime à explorer.

ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE

En raison de limitations de résolution et de dynamique, les observations astronomiques ne parviennent pas toujours à appréhender précisément toutes les situations



Bancs de condensateurs du LNCMI. © Oliver PORTUGALL

astrophysiques et leurs évolutions. Les avancées dans le développement **des lasers de haute énergie (kJ-ns), couplées à l'application des lois d'échelle des systèmes astronomiques**, permettent de produire en laboratoire des données inestimables complétant les observations astronomiques et permettant de tester les modèles théoriques. Le foisonnement des résultats récents découle de la possibilité d'adopter une approche paramétrique et reproductible de ces phénomènes astrophysiques. Les exemples incluent, sans s'y limiter : (i) la physique des chocs radiatifs et magnétisés, tels que ceux des vestiges de supernovae ; (ii) l'accélération des rayons cosmiques et les instabilités plasmatiques associées ; (iii) les opacités pour les intérieurs stellaires ; (iv) les processus d'accrétion et d'éjection de matière dans les étoiles nouvellement formées ainsi que dans les étoiles évoluées et les objets compacts ; (v) les instabilités fluides et thermiques ; et (vi) la reconnexion magnétique et la turbulence dans les régimes fortement compressibles. Ces dernières années, de nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine du couplage **laser-plasma et champ magnétique externe**, ouvrant de nouvelles perspectives de recherche sur les plasmas magnétisés, omniprésents dans l'univers. Pour aller plus loin, **des diagnostics innovants basés sur des sources secondaires souvent générées par des lasers d'impulsion fs-ps (multi-PW, XFEL) devront être couplés avec des systèmes laser ns de classe kJ**. Les outils de modélisation développés en support aux expériences couvrent en partie les régimes cinétiques et magnéto-fluides, mais devront être poussés au-delà. Ces avancées contribueront à améliorer notre compréhension des phénomènes parmi les plus énergétiques de l'univers, tout en aidant la communauté à comprendre et

interpréter les actuelles et futures observations terrestres et spatiales.

PHYSIQUE DES HAUTES PRESSIONS

La physique des hautes pressions cherche à explorer la matière très condensée à toutes les échelles. Dans des systèmes comportant au moins trois espèces atomiques et même dans des matériaux réputés simples (hydrogène), on ne peut actuellement réellement ni mesurer ni prédire des propriétés telles que le caractère isolant/métal, solide/liquide, la supraconductivité ou le caractère super-ionique dès lors que la pression est de l'ordre **du térapascal (1 TPa = 10 Mbar)**. De nouveaux outils expérimentaux commencent à franchir cette nouvelle frontière de pression. Le défi est de mettre en place des mesures précises sous de telles conditions thermodynamiques.

Une immense révolution scientifique est en cours avec la découverte de nombreuses exoplanètes telluriques de diamètres significativement plus élevés que celui de la Terre. Dans ces objets, les pressions sont typiquement dix fois plus grandes qu'au centre de notre planète (0.36 TPa). Pour cette raison, les propriétés macroscopiques (solide/liquide, métallique/isolant) de leurs matériaux constitutifs restent inconnues. Or ces données seraient nécessaires pour comprendre la formation, l'évolution, et in fine l'habitabilité de ces corps célestes. Ce domaine de pression est également pertinent pour les planètes de type Uranus ou Neptune qui abritent dans leurs manteaux d'énormes masses de glaces à l'état fluide ou solide, sans doute super-ioniques et parfois capables d'entretenir des dynamos magnétiques. Enfin, la compréhension des géantes

gazeuses de type Jupiter ou super-Jupiter, encore plus comprimées, nécessiterait de déterminer le diagramme de phases de l'hydrogène et de l'hélium dans le domaine du TPa. Ces planètes géantes pourraient aussi contenir **des phases condensées encore totalement inconnues.**

L'expérimentation à ces pressions extrêmes permettrait aussi des avancées majeures en physique de la matière condensée par la découverte de nouveaux états électroniques et de phénomènes quantiques (comme la supraconductivité) à des températures inhabituellement élevées ou d'hybridation d'orbitales atomiques de cœur (chimie du keV). L'explosion récente de la **chimie du Mbar** démontre la potentialité des synthèses haute pression de matériaux innovants (super-hydrures, poly-N, clathrates) pour le transport et le stockage d'énergie. Un enjeu majeur sera de développer des méthodes pour stabiliser à pression ambiante ces matériaux métastables. Comme évoqué dans d'autres sections, des progrès dans le domaine des matériaux quantiques viendront du couplage des pressions extrêmes en enclume diamant (DAC) avec d'autres paramètres (basses températures, champs intenses...) et des techniques spectroscopiques de plus en plus sophistiquées.

Plusieurs TPa et quelques milliers de Kelvin peuvent être maintenus dans la matière condensée par une combinaison de chocs et de compressions isentropes, à condition d'utiliser des lasers capables de délivrer des énergies très élevées pendant quelques ns. **Pour atteindre des pressions jusqu'à 1 TPa, il faudra associer un laser de classe kJ-ns à des sources de rayons X-ps/fs et de grande qualité spectrale telles qu'un synchrotron (ps) ou surtout un XFEL.**

Toutes ces avancées ne seront réellement possibles que si la **fabrication de précision des matériaux cibles** utilisés dans ces expériences connaît un progrès important et concerté.

En parallèle, la précision numérique des mesures sous haute pression doit fortement s'améliorer, et plus particulièrement la détermination des températures, pour obtenir des diagrammes de phases quantitatifs à partir des énergies libres calculées. Des mesures systématiques de diffraction et diffusion de rayons X pendant la compression laser permettraient des améliorations additionnelles. Les cellules enclumes de diamant ont fait d'énormes progrès en termes de pressions atteintes et de précision des mesures de température. Il reste à améliorer le chauffage laser en DAC, en s'appuyant sur des diagnostics résolus en temps, et à étendre les domaines de pression accessible (du DAC au-delà de 0.4 TPa reste trop exceptionnel). **Cette prospective détermine comme prioritaire la possibilité d'expériences de qualité métrologique jusqu'à 0.5 TPa et quelques milliers de Kelvin en couplant DAC et sources ultra brillantes de rayonnement synchrotron.** Ce domaine étendu de pression et température des DAC permettra un progrès majeur de la thermodynamique des conditions extrêmes.

Sera-t-on pour autant en mesure d'atteindre un état d'équilibre thermodynamique dans le matériau complexe fortement comprimé par laser pendant les quelques ns disponibles après la rampe de compression? **Il n'existe aucune théorie ni modélisation numérique** capable de répondre de manière exhaustive à la question cruciale du comportement de la matière comprimée rapidement lorsque les durées approchent celles du temps de l'équilibre thermodynamique. En couplant des sources X très résolues en temps avec des compressions dynamiques (ns), des DAC dynamiques (ms) et DAC statiques (>1 s), on sera en mesure de suivre les chemins réactionnels et de déformations précis au cours de la compression/chauffage. Avec l'appui de modélisations numériques, une compréhension générale des modes de relaxation de la matière condensée en réponse à des sollicitations à différentes échelles temporelles et à des pressions vraiment extrêmes sera alors envisageable.

RECHERCHE FONDAMENTALE DANS LE CONTEXTE DE LA FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL (FCI)

Une étape extrêmement importante pour la démonstration de la FCI comme source d'énergie a été franchie en 2022 à la National Ignition Facility: dans un schéma dit d'attaque indirecte, l'énergie de fusion produite (3,15 MJ avec point chaud central à 0,5 Tbar et $T_{\text{ion}} \sim 13$ keV) a dépassé l'énergie de 2 MJ investie par faisceaux laser, soit un gain d'énergie $G=1,5$ avec la création d'un plasma dans le régime de combustion thermonucléaire. Cette démonstration n'est qu'un premier pas vers la génération d'énergie. La viabilité d'un réacteur à fusion dépend de notre capacité à relever de nombreux défis: **(I) atteindre $G > 100$; (II) augmenter la cadence laser jusqu'à quelques tirs par seconde; et (III) augmenter le rendement laser à plus de quelques dizaines de %.** Cependant, le concept d'attaque directe dans lequel la cible est directement irradiée par les lasers, est préférable pour augmenter les gains cible G . Différents schémas d'attaque indirecte font l'objet de recherches fondamentales: (I) l'allumage par choc qui utilise une seconde impulsion laser plus intense; (II) l'allumage rapide par ions légers énergétiques qui demande le couplage avec des lasers plus courts (10 ps); ou (III) l'allumage par implosion laser assistée par un champ magnétique externe d'amorçage. Les défis sont **de maîtriser l'interaction laser-plasma, les instabilités hydrodynamiques ainsi que les turbulences associées pour atteindre une reproductibilité des processus d'allumage des combustibles.** À ceci vient s'ajouter le développement de cibles plus performantes et de matériaux plus résistants aux conditions extrêmes du réacteur. L'obtention de l'ignition est indispensable pour la production d'énergie, mais elle ouvre également un champ de recherche encore inexploré en physique des plasmas: le **régime de combustion nucléaire.** Les processus fondamentaux de ces plasmas de fusion (dépôt et transport d'énergie, pouvoir d'arrêt des particules rapides) sont encore mal connus.

RECHERCHE FONDAMENTALE POUR LA FUSION PAR CONFINEMENT MAGNÉTIQUE (FCM)

La FCM nécessite le maintien d'un plasma D-T d'une densité de 10^{20} particules/m³ à une température de 3.10^8 K pendant un temps suffisamment long pour permettre aux réactions de fusion thermonucléaires de se produire. Cette température chute à environ 10^4 K sur une distance de 2 m dans le tokamak ITER, près de l'enceinte à vide. L'interaction du plasma avec le champ EM et avec ce gradient de pression a des conséquences majeures sur le confinement plasma. Les conditions de bord spécifiques aux tokamaks jouent un rôle crucial dans la physique de l'interaction plasma-paroi. L'un des objectifs de la décennie à venir est **de développer des diagnostics extrêmement précis, accompagnés de modélisations bénéficiant des dernières avancées en calcul de haute performance afin de progresser dans la compréhension des mécanismes en jeu**. Les tokamaks dédiés à la recherche fondamentale (WEST à Cadarache et DTT en Italie par exemple) jusqu'au démarrage d'ITER seront utilisés dans la décennie 2030, pour comprendre l'organisation des modes dans le plasma et l'optimisation du régime d'opération. Les résultats d'ITER conditionneront l'avancée vers un futur réacteur de démonstration, potentiellement plus compact grâce aux aimants HT_c (certains projets existent déjà aux USA et en Chine). Le développement de ces machines FCM d'accompagnement est primordial également pour maintenir la formation des jeunes chercheurs dans le domaine de la recherche sur l'énergie thermonucléaire (par ex. SPEKTRE à l'IJL, Nancy).

CHAMPS MAGNÉTIQUES INTENSES

Ce domaine scientifique est intimement lié à la fois aux progrès de l'outil champ magnétique lui-même et à la notion d'extrême qui ne se limite pas à la valeur maximale du champ, mais qui inclut aussi le volume et le temps disponibles voire sa stabilité spatiale et temporelle. Au niveau mondial, le fait majeur est l'arrivée récente de bobines en supraconducteur à haute température critique (HT_c), qui permettent de générer des champs continus (environ deux fois) plus intenses qu'avec des supraconducteurs bas-T_c (BT_c). Si elles n'égale pas pour l'instant les champs records des bobines résistives ou hybrides, ces bobines HT_c, insérées dans des bobines BT_c, atteignent déjà environ 30 T avec tous les avantages de la supraconductivité : stabilité temporelle, durée d'expérience illimitée, très faibles perturbations électriques et mécaniques et surtout bien moindre consommation électrique. Même si la fiabilité de ces dispositifs complexes reste un défi, ces progrès devraient changer la donne dans de nombreux domaines, à l'échelle d'une ou plusieurs décennies. L'exemple le plus médiatique est la **fusion par confinement magnétique** où le gain en champ (B) réduit significativement le volume de confinement $V \propto B^{-4}$, à puissance de fusion égale. Cela permettrait de construire des machines plus compactes, dont l'intérêt pour la re-

cherche fondamentale est évoqué ci-dessus. En matière condensée, des temps de comptage de plusieurs jours requis par certaines spectroscopies (optique, champ proche, résonance magnétique nucléaire) seront désormais possibles au-delà de 20 T. Un tel aimant HT_c est en développement et viendra compléter les installations déjà disponibles au niveau national (champs résistifs continus jusqu'à 36 T et 43 T attendus en bobine hybride, champs résistifs pulsés jusqu'à 98,8 T, voire 200 T dans l'installation semi-destructive Megagauss). Les progrès de ces installations, en termes de champ maximal, de volume de champ disponible, de compromis champ maximal/temps de pulse, et de fiabilité vont impacter de nombreux domaines de la physique dans la prochaine décennie.

C'est d'abord le cas en **physique de la matière condensée**, et notamment dans le domaine des matériaux quantiques où les champs intenses servent à **comprendre et contrôler** les propriétés magnétiques, électroniques ou optiques. Ici, les progrès concerneront autant les techniques expérimentales que les bobines de champ. L'éventail des expériences va s'élargir aux techniques d'imagerie, optiques ou en champ proche (microscopie par effet tunnel notamment), qui devraient bénéficier de la montée en puissance des bobines HT_c, ainsi qu'aux spectroscopies résolues en temps (du THz aux rayons X) qui sont adaptées aux champs continus comme pulsés. Les premiers pas très récents de photoémission résolue en angle sous champ, même embryonnaires (0.1 T), démontrent bien toute l'importance de la variable champ magnétique. Les champs (continus et pulsés) vont continuer à se développer dans les **grands instruments** (source de neutrons, synchrotron, laser intense et XFEL) où leur énorme potentiel est encore sous-exploité malgré des résultats déjà probants. Pour certaines mesures (RMN, imagerie optique, caractérisation de câbles supraconducteurs) les champs pulsés ne remplaceront jamais les champs continus, mais ils pourront contribuer à des résultats novateurs. Toutes ces techniques expérimentales vont aussi être associées à des conditions de plus en plus extrêmes de température (cryostats à ³He ou à dilution ³He/⁴He) et/ou de pression en cellules à enclume diamant (de quelques dizaines à quelques centaines de GPa).

Ces développements bénéficieront aux sujets à fort potentiel en découverte de nouveaux composés comme les matériaux 2D, les matériaux topologiques ou les supraconducteurs à éléments légers, mais aussi pour tous les états exotiques induits par le champ magnétique : états supraconducteurs spatialement texturés ou réentrants, états liquide de spins (systèmes Kitaev et autres), transitions de phases quantiques vers des états magnétiques ou électroniques inédits. On peut espérer qu'à terme ces systèmes soient compris avec la même précision que les systèmes unidimensionnels où le champ permet un tel contrôle des corrélations électroniques que l'on considère parfois ces systèmes comme des simulateurs quantiques. Enfin, les cuprates HT_c, dont la supraconductivité peut être détruite en champ intense, sont une thématique encore très limitée par l'intensité du champ. Il ne

fait aucun doute que des progrès sont à prévoir dans les dix ans à venir, par exemple via des mesures de transport en installation Megagauss. À long terme, des champs de plusieurs centaines de Tesla pourraient permettre de contrôler les propriétés de la matière en agissant directement sur la liaison chimique.

Les progrès en termes de champ maximal dans un volume donné ont pour corollaire l'augmentation du volume disponible à champ identique, une dimension essentielle pour certaines recherches fondamentales comme appliquées. On citera notamment l'**astrophysique de laboratoire** où les gains en intensité de champ enrichiront l'éventail des sujets d'étude alors que les gains en volume permettront d'implémenter des outils de diagnostic de plus en plus précis, par exemple via un XFEL. Par ailleurs, des champs résistifs pulsés pourraient venir compléter le schéma de FCI. Les champs continus, eux, sont amenés à être utilisés pour une branche émergente de la **physique des particules**, les très basses énergies, où certains candidats pour la matière noire (axions et particules axion-like) ou pour l'énergie noire (caméléons) pourraient être détectés via leur oscillation quantique avec un photon, induite par le champ (probabilité de détection $\propto V B^2$ dans un volume V).

Si l'apport des champs magnétiques extrêmes est reconnu dans de nombreux autres domaines (caractérisation de câbles supraconducteurs, biréfringence du vide), leur potentiel paraît encore sous-exploité. Par exemple, des métaux liquides, voire des électrolytes transparents en champs extrêmes continus, permettent d'aborder des questions fondamentales de **magnétohydrodynamique** (effet dynamo, ondes d'Alfvén ou magnéto-Coriolis, transition 2D/3D de la turbulence). Les larges volumes permettront aussi de mieux exploiter les gradients de champ, utiles en astro/géophysique de laboratoire, dans les expériences de lévitation qui simulent des conditions de microgravité ou encore en **magnétoscience** à haute température ($\sim 2000^\circ\text{C}$).

LA PHYSIQUE AU MILLIKELVIN, DITE BASSES TEMPÉRATURES

Les basses températures désignent un domaine de la physique de la matière condensée où des techniques cryogéniques **refroidissent une quantité macroscopique de matière** liquide ou solide. Ceci peut inclure des circuits mésoscopiques lithographiés, un échantillon, sa cellule expérimentale, et souvent une partie de l'équipement de mesure (ex: préamplificateur bas bruit). Ces techniques sont donc distinctes du refroidissement par laser des atomes froids (voire des ions ou nanoparticules piégés optiquement).

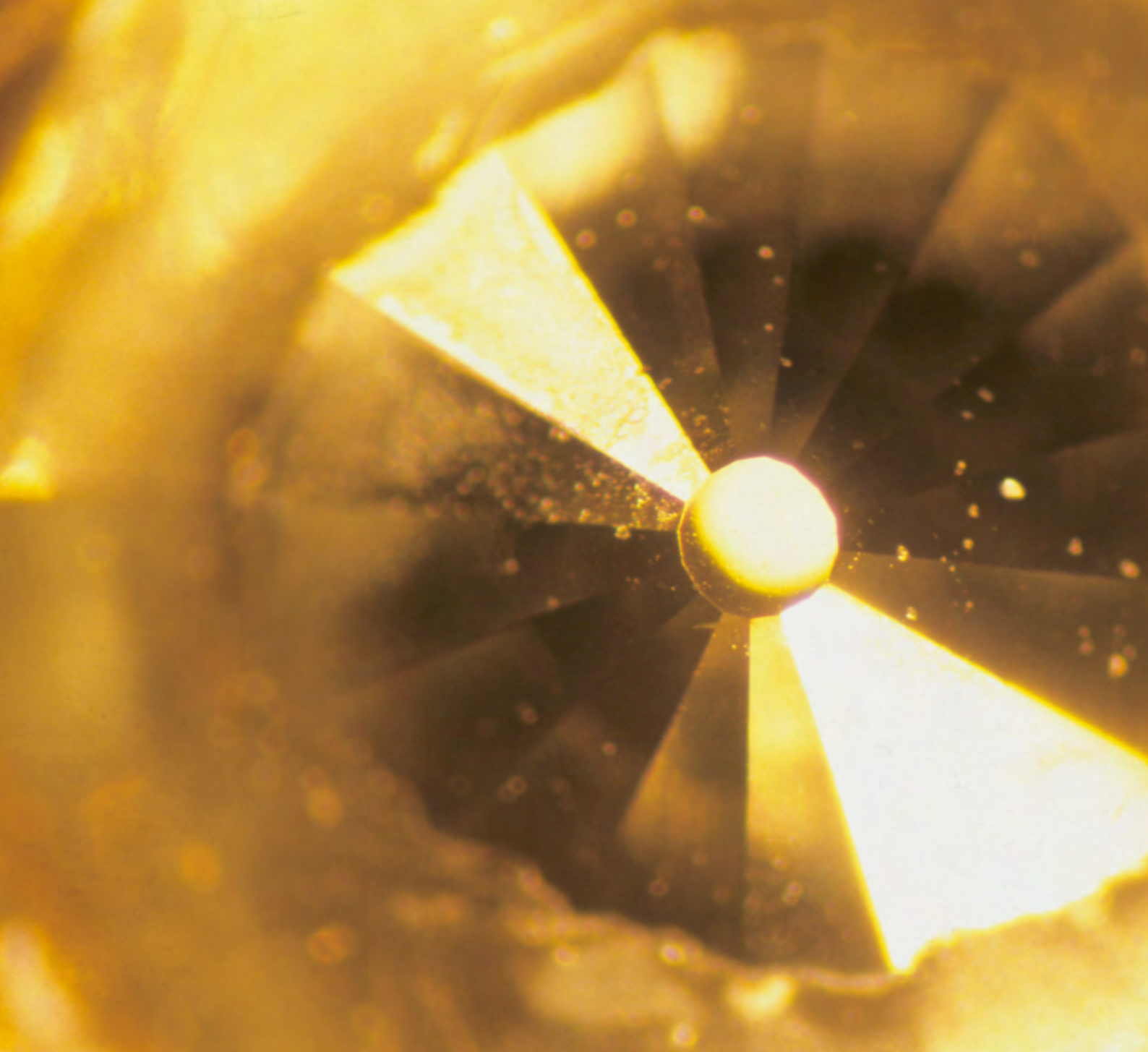
Une forte expertise en cryogénie est présente en France et en Europe (avec de fortes collaborations), ce qui a permis une recherche académique de premier plan à basse température et a aussi mené à un certain nombre de startups, comme Silent Waves récemment en France

(amplificateurs quantiques). La notion d'extrême en cryogénie ne se caractérise pas simplement par la seule température T , mais par une combinaison $T \ll 300\text{ K}$ avec un champ magnétique B , une pression P , ou une certaine résolution de mesure (en temps, en énergie - à la limite quantique par exemple). Les perspectives en cryogénie peuvent se décrire selon trois axes :

— **Technologie habilitante** : qui recouvre les domaines utilisateurs de machines frigorifiques où les sujets de recherches sont déjà matures, avec des technologies cryogéniques commercialement disponibles, mais où un **saut technologique sera nécessaire** pour faire avancer l'ingénierie et l'applicabilité concrète des recherches. C'est typiquement le cas de l'ingénierie quantique. La détection quantique (cryptographie basée sur des photons) demandera des systèmes basse puissance, de mise en froid rapide et très compacts, atteignant des températures de l'ordre du Kelvin (par désaimantation de sels paramagnétiques, par exemple). À l'inverse, les qubits de spin semi-conducteurs demanderont des plateformes très grandes, très puissantes, atteignant 500 mK (e.g. cryostat à circulation de ^3He). Enfin les qubits supraconducteurs requièrent aussi des grandes tailles et de fortes puissances, mais des températures de l'ordre de 10 mK (cryostat à dilution « hors normes »). De telles plateformes sont en partie en développement aujourd'hui, en partenariat entre l'académique et le privé, avec de vrais défis technologiques à la clé.

— **Les matériaux quantiques** : un volume important des recherches à basse température s'intéresse à la compréhension fondamentale de la physique (quantique) régissant la matière, sur de nouveaux matériaux, comme les supraconducteurs non conventionnels, les gaz 2D d'électrons dans les semiconducteurs, les états topologiques et excitations exotiques (fermions de Majorana et autres quasi-particules anyoniques), le magnétisme frustré (liquides de spins et verres de spins) ou les ondes de densité de charge. Beaucoup de ces systèmes donnent lieu à des points critiques quantiques (transitions de phases à $T=0$) dont l'étude nécessite de très basses températures, mais aussi d'autres conditions extrêmes comme les forts champs ou les hautes pressions. Les difficultés inhérentes à la synthèse de ces nouveaux matériaux font qu'il est **souvent crucial de faire plusieurs mesures différentes sur le même échantillon**, ce qui rend la mesure également extrême. Le défi sera ici de proposer des systèmes qui soient polyvalents, adaptés aux très petits échantillons (dont la synthèse est souvent un défi), et intégrant de multiples sondes afin d'effectuer simultanément diverses mesures (e.g. transport thermique et spectroscopie), sur le même échantillon. La compatibilité basse température/fort champ ou haute pression, ainsi que celles de différentes techniques de mesure et leur intégration (fenêtre optique et cryogénie, par exemple) nécessiteront de nouveaux développements cryogéniques complexes, souvent spécifiques à chaque niche.

— **Dans le domaine de la cryogénie ultime** (fluides et solides quantiques, systèmes-modèles), les développements vers des températures toujours plus froides vont de pair avec **les recherches les plus fondamentales**



Enclume diamant : facettes et table expérimentale.
© Richard LAMOUREUX/CNRS Images

en physique de la matière condensée. L'étude de l' ^3He superfluide, un système-modèle unique, nécessite des températures records aussi basses que $100\ \mu\text{K}$ (par désaimantation adiabatique nucléaire), atteintes uniquement dans quelques laboratoires dans le monde. L'étude des propriétés basse énergie des systèmes amorphes est elle aussi conduite jusqu'à ces températures extrêmes, afin de révéler la nature des excitations élémentaires de ces systèmes (systèmes à deux niveaux). Des systèmes-modèles uniques (à base d'hélium, de résonateurs nano-mécaniques ou micro-ondes) permettent de faire le lien entre la physique de la matière condensée et

d'autres branches de la physique : cosmologie (transition de phases de l' ^3He), gravitation quantique (opto-mécanique ultra-froide), physique des particules (recherche d'axions en cavité supraconductrice), ou encore physique moléculaire (spectroscopie et dynamique de dopants en gouttelettes d' ^4He superfluide). La recherche de nouveaux états exotiques de la matière conduit à descendre toujours plus bas en température, afin de résoudre de nouveaux phénomènes (par exemple l'interaction des électrons avec les spins nucléaires). Implémenter de telles technologies est éminemment complexe, et requiert un savoir-faire tout particulier.



SIGLES

ARPES : Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy

as : attoseconde

C-RT : Cristallographie Résolue en Temps

DAC : enclumes de diamant

D-T : Deutérium-Tritium

EELS : Electron Energy Loss Spectroscopy

ELI : Extreme Light Infrastructure

EM : ElectroMagnétique

EPSRT : Expérience Pompe-Sonde Résolue en Temps

EXAFS : Extended X-ray Absorption Fine Structure

FEL : Free Electron Laser ou laser à électron libre

fs : femtoseconde

FCI : Fusion par Confinement Inertiel

FCM : Fusion par Confinement Magnétique

HEQ : Hors-Équilibre

IA : Intelligence Artificielle

LIBS : Laser Induced Breakdown Spectroscopy

LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory

ns : nanoseconde

PNL : Phononique Non-Linéaire

PEEM : PhotoEmission Electron Microscopy

ps : picoseconde

QED : électrodynamique quantique

R&D : Recherche et Développement

RMN : Résonance Magnétique Nucléaire

RT : Résolu en Temps

SFQED : électrodynamique quantique en champ fort

STM : Scanning Tunneling Microscope

TEM : Transmission Electron Microscopy

UTEM : Ultrafast Transmission Electron Microscopy

XAS : X-ray Absorption Spectroscopy

XES : X-ray Emission Spectroscopy

XFEL : X-Ray Free-Electron Laser facility

XMCD : X-ray Magnetic Circular Dichroism

XRC ou **XRD** : X-ray Crystallography/Diffraction



Zone de tourbillon dans une bulle de savon soumise à une variation de température.
© Hamid KELLAY/LOMA/CNRS Images

Physique des systèmes complexes

RÉSUMÉ

Le **climat** et l'**environnement** sont des systèmes complexes typiques, pour la compréhension desquels la physique a un rôle central à jouer. La physique statistique pourra caractériser les phénomènes extrêmes (canicules, crues) ou dommageables (tremblements de terre, avalanches), évaluer leur risque et prédire leur impact sur différents réseaux couplés (énergie, communications, réseaux sociaux, économiques ou financiers). La physique non linéaire sait décrire les phénomènes de multi-stabilité et les bifurcations, et participer à la paramétrisation des petites échelles du climat via, par exemple, l'étude de l'interaction ondes-atmosphère ou de l'agrégation des nuages.

En turbulence, il faudra étudier les échelles plus grandes que l'échelle d'injection (pour par exemple savoir à quel point elles sont à l'équilibre statistique) et les échelles sous-diffusives (rôle des singularités et du bruit), ainsi que les régimes non-stationnaires ou non-homogènes, tels le couplage plancton-turbulence dans la circulation océanique. Mieux comprendre la turbulence d'ondes forte et la turbulence convective permettra d'améliorer respectivement les modèles océaniques et la formation des nuages ou l'interaction glace-eau de mer.

La dynamique des écosystèmes implique des échelles très variées qu'il faudra observer et modéliser en élucidant les effets de mémoire, les mécanismes de sélection et d'acquisition (ou de modification) de fonctions biologiques ou écosystémiques, et en distinguant le rôle des contraintes extérieures et celui des interactions entre individus ou espèces.

L'émergence d'*expériences de physiciens* sur des systèmes modèles de **matière active**, de matière informée, de matière programmable ou de systèmes inter-espèces sera un apport majeur pour comprendre des systèmes et des interactions de plus en plus hétérogènes et complexes, et à terme les contrôler. Le couplage entre la motilité des particules actives et leur écoulement complexe est à élucider. Les progrès expérimentaux pourront permettre le transfert en temps réel d'informations de plus en plus complètes du niveau micro vers le niveau macro et en retour une action sur le micro-monde.

Des **techniques de mesures** nouvelles vont émerger, utilisant des particules changeant de couleur selon les propriétés locales (cisaillement, vorticité, pH), ou des avancées en mesures ultra-rapides. Les réseaux de neurones biologiques pourront inspirer de nouveaux types dits neuro-

morphiques d'ordinateurs ou de caméras, sélectionnant les informations pertinentes dès l'acquisition des images.

Concevoir des villes moins énergivores, saines et limitant la ségrégation sociale requiert de comprendre l'évolution des structures urbaines et les dynamiques collectives humaines, sociales ou physiques (réseaux de transport, foules), tout en replaçant la ville dans un cadre plus large.

La théorie des systèmes hors-équilibre devra aller vers des systèmes, des interactions, voire des réseaux de plus en plus complexes et couplés (par exemple réseaux de transport et épidémies), et identifier le cas échéant de nouvelles classes d'universalité. Aux échelles **quantiques**, le couplage entre stochasticité et intrication, l'effet des mesures et des transitions de phase induites, ou l'hydrodynamique fluctuante de gaz de particules quantiques sont à explorer par la théorie et l'expérience.

Des défis liés aux ordinateurs du futur tels l'approche de la limite de Landauer ou la gestion de bits en environnement très bruité pourront être abordés par la thermodynamique stochastique et son approfondissement par des expériences modèles (démon de Maxwell biologiques ou synthétiques).

L'intelligence artificielle (IA) peut apporter beaucoup : analyse de données (spectaculaire en dynamique des foules), développement de modèles par des méthodes inverses (en particulier pour le vivant), paramétrisations sous-maille en turbulence. En retour, physique statistique et physique non-linéaire peuvent contribuer à la création d'algorithmes plus efficaces et plus sobres (s'inspirant par exemple du cerveau), et à une reprise de contrôle sur la boîte noire qu'est souvent l'IA (analyse des mécanismes d'apprentissage, auto-évaluation de la fiabilité des résultats et régulation des *fake news*, compréhension des dynamiques d'opinions et des risques pour la démocratie), dans un dialogue fécond avec les neurosciences.

Physique des systèmes complexes

PRÉAMBULE

Les systèmes complexes sont généralement caractérisés par un comportement global ne pouvant se ramener à une superposition de leurs composantes élémentaires, du fait d'influences réciproques et non-linéaires entre leurs différents niveaux d'organisation. Nous allons présenter ici des exemples typiques de tels systèmes, et le rôle central que la physique peut ou pourra jouer dans leur compréhension et leur contrôle.

Ce chapitre porte sur un domaine dont une autre caractéristique est d'être très interdisciplinaire. Ce qui fait l'identité de la communauté de recherche sur les systèmes complexes réside dans un ensemble de méthodes, d'outils, et de savoir-faire largement issus de la physique statistique et de la physique non linéaire. Cette approche permet d'étudier de nombreux systèmes physiques ou même sociaux, en lien avec d'autres disciplines. Nos outils permettent en particulier de s'intéresser aux différentes échelles d'un problème, et de faire le lien entre théorie, données et expériences.

Les deux premières parties, «physique statistique» et «physique non linéaire», sont centrées sur les outils. Elles se recouvrent d'ailleurs partiellement, ce qui témoigne des liens profonds qui existent entre ces deux sous-disciplines de la physique. Les deux dernières parties, «comportements collectifs et dynamique des populations en biologie et écologie» et «physique et société», mettent l'accent sur de vastes domaines d'application.

PHYSIQUE STATISTIQUE À L'ÉQUILIBRE ET HORS ÉQUILIBRE

La physique statistique se développe beaucoup à l'interface avec d'autres disciplines (informatique, mathématiques, chimie, mécanique, biologie). Des progrès théoriques peuvent venir de nouvelles possibilités expérimentales qui suggèrent de nouvelles questions, un transfert de techniques d'un domaine de recherche à un autre, ou une ré-interrogation de notions largement acceptées.

DES SYSTÈMES HORS ÉQUILIBRE

Depuis une trentaine d'années, la description théorique des systèmes classiques hors équilibre a progressé grâce au dialogue entre des solutions exactes de modèles «jouets», et une approche macroscopique plus phénoménologique. Cette description utilise pleinement

le formalisme des grandes déviations. En particulier, les systèmes diffusifs peuvent être appréhendés au niveau macroscopique par la théorie macroscopique des fluctuations (MFT), qui va clairement continuer de se développer et trouver des généralisations, par exemple en direction de nouvelles applications, de liens avec les systèmes intégrables, ou de réalisations expérimentales. C'est un domaine dans lequel les liens avec les mathématiques sont et resteront étroits et fructueux.

La théorie des grandes déviations est une théorie asymptotique, dont le grand paramètre peut être le temps, le nombre de particules ou l'amplitude d'un bruit. Cette théorie a permis des avancées majeures, mais de nombreux systèmes réels fonctionnent hors de son régime de validité. Des méthodes non asymptotiques, par exemple celles issues de la théorie de la concentration de la mesure, permettront aux physicien·nes de contrôler pour ces systèmes ce que la théorie des grandes déviations ne décrit pas. Il existe aussi des systèmes pour lesquels la limite de grande taille n'existe pas, notamment ceux présentant un désordre qui ne peut pas être homogénéisé (par exemple certains réseaux chimiques irréguliers) et qu'il faudra pouvoir traiter.

VERS UNE PHYSIQUE STATISTIQUE DES PHÉNOMÈNES EXTRÊMES

Dans un contexte où le dérèglement climatique va entraîner toutes sortes d'événements extrêmes, pouvoir explorer les fluctuations rares numériquement va devenir un outil de compréhension et un auxiliaire à la décision très précieux. Des algorithmes permettent déjà de repérer des motifs récurrents (*patterns*) dans les épisodes de canicule, ou de comprendre les évolutions de la fréquence de certains phénomènes naturels, et nous n'en sommes qu'aux prémices de ces approches.

Dans un monde hyperconnecté, il va être essentiel de mieux caractériser les fluctuations extrêmes au sein de divers types de réseaux (énergie, communications...), la résilience de ces réseaux vis-à-vis des effets négatifs de ces fluctuations, et le rôle des couplages entre réseaux. Cela pourra permettre de mieux anticiper les phénomènes de *black-out* sur les réseaux électriques, les crises dans les systèmes économiques, ou les propagations d'opinions à l'intérieur des réseaux sociaux. Toute une direction de recherche pourrait plus largement concerner la prévision des risques (fractures, tremblements de terre, avalanches...).

Les progrès algorithmiques devront aller de pair avec les développements théoriques : les phénomènes extrêmes dans les systèmes fortement corrélés, déjà explorés notamment avec les processus d'exclusion, recèlent encore bien des pistes à suivre. La distribution de Tracy-Widom pour la plus grande valeur propre d'une grande matrice aléatoire est un exemple paradigmatique, mais il y a très probablement de nouvelles classes d'universalité à mettre en évidence (une étape serait d'identifier de possibles liens entre les modèles, comme éventuellement entre la localisation d'Anderson et la turbulence) et de nouvelles méthodes à inventer.

PHYSIQUE STATISTIQUE, THERMODYNAMIQUE ET THÉORIE DE L'INFORMATION

Bien qu'on puisse faire remonter les liens entre physique statistique et théorie de l'information à la fondation de cette dernière, renforcer les recherches associant les deux domaines semble une voie intéressante pour la prochaine décennie, à une époque où les applications de la théorie de l'information sont omniprésentes.

La limite de Landauer par exemple, qui associe un travail minimal à l'effacement d'un bit d'information, pourrait devenir importante technologiquement, à mesure que l'électronique se miniaturise. Les travaux sur ce sujet (Comment approcher cette limite ? Peut-on la contourner, et si oui, comment ?), notamment expérimentaux, vont se poursuivre. Une autre question serait de pouvoir gérer des bits dans un environnement où le signal est de même niveau que le bruit. Les liens avec une thermodynamique stochastique quantique peuvent rapprocher ce thème de celui de la « théorie mésoscopique des fluctuations quantiques », tandis que les liens avec le problème classique des rapports entre thermodynamique et information peuvent rapprocher ce thème d'une physique statistique de la matière dite « informée », qui sera détaillée un peu plus bas. La question ancienne des liens entre l'entropie de Shannon (définie en théorie de l'information), et l'entropie physique (définie en thermodynamique) reste d'actualité. Une autre direction consiste à réaliser expérimentalement des démons de Maxwell, afin d'approfondir le rôle joué par l'information. Il existe déjà plusieurs tentatives en ce sens, par exemple avec des microleviers ou avec des jonctions Josephson. Les démons de Maxwell existent naturellement en biologie, impliqués en particulier dans la correction d'erreurs au sein de la cellule (réplication et transcription de l'ADN, par exemple), et leur étude est un champ amené à se développer. S'il était confirmé que les démons réalisés actuellement dans des granulaires ou de la turbulence sont effectivement équivalents à leurs homologues microscopiques, malgré l'emploi de températures effectives pour ces systèmes dissipatifs, l'emploi de ces modèles macroscopiques contournerait la difficulté d'observer des objets très petits et pourrait mener à des avancées importantes.

VERS LES PETITES ÉCHELLES : DU CLASSIQUE AU QUANTIQUE

Une voie paraît particulièrement originale et prometteuse : le développement d'une « théorie de champ moyen quantique ». Il s'agit ici de décrire des systèmes quantiques à une échelle suffisamment grande pour que le transport soit diffusif, mais plus petite que la longueur de cohérence, pour que les effets quantiques soient importants. À ces échelles, les couplages entre la stochastiquité due à l'environnement, les phénomènes proprement quantiques comme l'intrication, et aussi potentiellement les effets des mesures vont produire de nouveaux phénomènes encore largement à découvrir. Ces développements seront stimulés par les nouvelles possibilités expérimentales qui permettent, par exemple, l'étude de l'hydrodynamique fluctuante de gaz de particules quantiques ou de transitions de phase induites par les mesures elles-mêmes. Des outils théoriques importés d'autres disciplines pourraient également s'avérer utiles. L'utilisation des martingales s'est ainsi avérée pertinente pour expliquer le collapse quantique dû à des mesures itératives.

La conception et l'étude de modèles jouets, pour lesquels des progrès analytiques sont possibles, sont une tâche ardue, mais qui a commencé. On peut imaginer que, comme pour le cas classique, ce serait une étape vers une théorie de portée plus générale, dont on ignore à ce jour la forme.

VERS UNE COMPRÉHENSION DES RÉSEAUX DE NEURONES PROFONDS

Les réseaux de neurones profonds sont en plein développement, avec des applications qui se généralisent, mais ils conservent un aspect de « boîte noire ». Les dangers potentiels de l'IA apparaissent de plus en plus explicitement, et un débat sociétal sera nécessaire. Remplacer les boîtes noires par une véritable compréhension, ancrée par exemple dans les mécanismes sous-jacents (IA dite « guidée ») serait une réponse que pourrait apporter la physique. Les enjeux sont de rendre les apprentissages plus efficaces et plus sobres, mais aussi de rendre l'IA moins influençable par les *fake news*, voire de créer des IA capables d'évaluer la qualité des informations qu'elles délivrent. Cette compréhension de l'IA sera nécessairement multidisciplinaire, mais la physique a des atouts pour y jouer un rôle de premier plan :

1) Sur un plan expérimental, les physicien·nes ont une expérience et un savoir-faire dans l'étude numérique des systèmes complexes à grand nombre de paramètres, dans un cadre rigoureux : étude de la sensibilité par rapport aux paramètres et de la dépendance par rapport à la taille, proposition d'observables pertinentes, recherche de comportements universels. Ces compétences, originales par rapport à celles apportées par l'informatique, les mathématiques ou l'ingénierie, s'appliqueront à l'étude d'un réseau de neurones vu comme un système complexe à étudier et comprendre. C'est en fait déjà le cas, et ce mouvement devrait s'amplifier.

II) Sur un plan théorique, la compréhension des réseaux de neurones progressera à chaque fois que les observations expérimentales pourront être rationalisées par des études analytiques de modèles jouets, mettant en évidence les phénomènes importants. La physique statistique donne l'expérience de cette démarche et de nombreux outils pour cela. En particulier, la physique statistique des systèmes désordonnés, utilisée depuis longtemps pour l'analyse d'algorithmes et en inférence statistique, continuera d'être importante dans ce cadre. Le traitement du signal, les systèmes de particules en interaction ou encore les matrices aléatoires jouent déjà un rôle, mais de nouvelles applications, pour l'instant insoupçonnées, des outils classiques de physique statistique verront certainement le jour.

INFÉRENCE STATISTIQUE : MÉTHODES INVERSES

L'IA est l'un des volets de l'analyse de données, que l'on peut considérer dans le cadre général de l'inférence statistique. Pour celui-ci, la physique statistique a grandement contribué au développement des méthodes inverses (c'est-à-dire l'identification des paramètres d'un modèle à partir de données) en s'appuyant sur la méthode de l'entropie maximale. Les applications sont diverses : neurosciences (reconstruction des interactions entre neurones à partir des données d'activité neuronale), matière active et éthologie (analyse des vols d'étourneaux), immunologie, ou encore étude du microbiote. Ce domaine à la frontière entre physique statistique et inférence statistique, entre théorie de l'information et IA, va poursuivre son développement.

INTERFACE IA/NEUROSCIENCES

Le développement de réseaux de neurones artificiels et celui de la modélisation en neurosciences (ou plus généralement de la modélisation cognitive) ont toujours été interdépendants. L'interface IA/neurosciences est en plein essor, et la physique y contribue activement. Les progrès considérables des méthodes expérimentales en biologie donnent accès à des données toujours plus massives et plus fines. Les méthodes récentes de *deep learning* apportent de nouveaux outils pour l'analyse et la modélisation. Dans ce contexte de la modélisation en neurosciences, à la fois informatique, théorique et expérimental, la physique statistique va continuer de jouer un rôle moteur.

PHYSIQUE NON LINÉAIRE

La physique non-linéaire regroupe des communautés qui travaillent dans des domaines scientifiques différents, mais qui utilisent des outils et des concepts communs pour mettre en évidence des phénomènes et des mécanismes génériques, c'est-à-dire indépendants du système particulier étudié.

Un exemple typique d'un tel concept est la notion de bifurcation issue de la théorie des systèmes dynamiques.

Son rôle est central en théorie de la turbulence, tout comme son importance et son actualité, notamment pour ses applications en dynamique climatique. Une autre ligne de force concerne les problèmes liés à l'état actuel de la société et son évolution : on peut citer le changement climatique, bien sûr, mais aussi les conditions de vie, la résilience des écosystèmes, les économies d'énergie, l'utilisation de l'intelligence artificielle comme aide à l'amélioration des mesures et des simulations, mais aussi comme objet d'études. Le fort ancrage expérimental de la physique non-linéaire nous amènera aussi à faire ressortir, de manière non exhaustive, quelques techniques expérimentales émergentes et prometteuses.

CLIMAT

La physique des systèmes complexes non linéaires pourrait jouer à l'avenir un rôle précurseur dans les développements méthodologiques pour les sciences du climat. Le cœur de cette physique est de considérer des systèmes modèles de complexité suffisante pour présenter des dynamiques riches (par exemple présentant de la multi-stabilité), mais suffisamment modérée pour permettre l'analyse fine des mécanismes et l'expérimentation méthodologique. Une compréhension accrue des processus non résolus à l'échelle de la maille de simulation, nécessaire à leur paramétrisation, est un point très important : le déferlement d'ondes et l'interaction ondes-atmosphère, les mélanges turbulents en proche paroi, la convection turbulente et l'agrégation des nuages en sont quelques exemples. Il reste ensuite une part de liberté dans la construction de modèles physiques effectifs à l'échelle de la maille et leur paramétrisation. Ces dernières années ont vu le développement de paramétrisations stochastiques, ne s'attachant pas seulement à reproduire la moyenne d'un processus non résolu, mais également sa variance. Une question fondamentale ouverte dans de nombreux domaines est : doit-on s'attendre à ce que les fluctuations aux petites échelles modifient la dynamique des grandes échelles ? Enfin, l'usage de simulations à toujours plus haute résolution ne peut pas être une fin en soi. Certes, la haute résolution permet de s'affranchir de paramétrisations (par exemple, des tourbillons méso-échelles deviennent résolus pour des mailles de l'ordre de 10 km). Mais le coût carbone devient alors exorbitant, en particulier lorsque l'on prend en compte les longues durées des simulations du climat et la nécessité de réaliser ces simulations par centaines afin d'obtenir la distribution de probabilité des états futurs possibles. Une solution en vogue depuis quelques décennies et revitalisée depuis les années 2010 est de développer des modèles ayant un nombre réduit de variables, que l'on construit par apprentissage statistique (caricaturalement des régressions) ou par apprentissage automatique (réseaux de neurones) sur des données temporelles obtenues par des simulations de haute fidélité. Ces modèles réduits peuvent ensuite être utilisés pour prédire l'état d'un système aux temps longs. Le défi est maintenant de développer des paramétrisations « nouvelle génération »

(s'intéressant, par exemple, au nombre de Nusselt et à sa variance en convection thermique) et de caractériser les processus à plus petite échelle. Des avancées dans ces directions pourraient améliorer en profondeur les connaissances sur les changements climatiques en cours et donner des pistes pour augmenter la résilience du système climatique (voir aussi le chapitre *Physique pour l'énergie et le climat*).

RÔLE DES SINGULARITÉS EN TURBULENCE ET POUR LE CLIMAT

Les écoulements turbulents sont omniprésents dans la nature et ils présentent des tourbillons et des structures cohérentes de différentes tailles, définissant les différentes échelles de la turbulence.

Les échelles plus petites que l'échelle dissipative sont souvent considérées comme n'étant pas pertinentes et n'ayant pas besoin d'être prises en compte dans les simulations numériques. De récents progrès, théoriques et expérimentaux, suggèrent cependant que de nombreux phénomènes se produisent en dessous de l'échelle dissipative, et qu'ils peuvent affecter la validité des équations de Navier-Stokes comme modèle pour la dynamique des fluides industriels, géophysiques ou astrophysiques. Parmi eux, un phénomène est particulièrement scruté par les théoriciens de la turbulence : le développement de *singularités* ou quasi-singularités, provoquant la non-unicité des solutions. Ce phénomène conduirait alors à une *stochasticité spontanée*, rendant non pertinente la notion de « vitesse déterministe en un point » et induisant une séparation des trajectoires indépendante de leur séparation initiale. Cette particularité pourrait être renforcée par le *bruit thermique*, qui entrerait en jeu à des échelles beaucoup plus élevées que l'échelle fluide. L'exploration de ces phénomènes requiert des outils multi-échelles et des techniques de visualisation avancées (vélocimétrie de suivi de particules 3D —*Particle Tracking Velocimetry*— et vélocimétrie par image de particules —*Particle Image Velocimetry*) dans des expériences turbulentes de grande taille, ainsi que des simulations numériques ultra-résolues.

En turbulence d'ondes, d'autres singularités et structures cohérentes se trouvent impliquées, telles que les ondes à crête raide, le moutonnement en océanographie, les ondes de choc dans les plasmas, ou les cônes de Dirac dans les ondes élastiques des plaques minces. Ces structures cohérentes dissipatives, fortement non linéaires, affectent la dynamique dont la description reste ouverte et sort du cadre de la théorie de la turbulence faiblement non linéaire. Mieux comprendre cette turbulence d'ondes permettrait d'en tenir compte dans les modélisations du climat pour prédire l'état des océans et leurs échanges avec l'atmosphère, ou dans l'analyse de différents phénomènes, tels que l'intermittence dont l'origine pourrait être liée à la dimension fractale des structures cohérentes.

La compréhension de la turbulence convective est aussi un enjeu de plus en plus important. La modélisation phy-



Banc de poissons. © Milos PRELEVIC, Unsplash

sique de phénomènes auxquels elle est reliée comme la formation de panaches, l'interaction entre les panaches et l'écoulement moyen, la relation entre la couche limite thermique et la couche limite hydrodynamique, ou encore l'interaction entre la convection et les ondes, reste un vrai défi fondamental dans le cas très turbulent. Des avancées à ce niveau pourraient améliorer les modèles de climat. Des exemples sont la formation des nuages, l'interaction glace-eau de mer, la fonte des glaces à la surface de l'eau (phénomènes très non linéaires et turbulents) qui ont une influence importante sur le climat et



dont la modélisation, très loin d'être accomplie, serait un atout pour obtenir une modélisation du climat beaucoup plus réaliste.

Enfin, dans ces turbulences (turbulence d'ondes, turbulence classique ou turbulence convective), les régimes non-stationnaires et non-homogènes n'ont été que peu explorés, du fait qu'ils sortent du cas habituel des prédictions de la théorie de Kolmogorov. Ils sont pourtant essentiels pour obtenir une description plus réaliste des phénomènes turbulents et effectuer de meilleures pré-

dictions du climat ou d'autres phénomènes comme le couplage plancton-turbulence.

LA MÉCANIQUE STATISTIQUE À L'ÉQUILIBRE POUR DÉCRIRE LES PROPRIÉTÉS AUX GRANDES ÉCHELLES DES ÉCOULEMENTS TURBULENTS

La modélisation de la turbulence à trois dimensions est un enjeu important dans de nombreux domaines académiques et industriels. La majeure partie des efforts a porté sur l'étude de la cascade inertielle vers les petites

échelles. En revanche le comportement des échelles plus grandes que l'échelle d'injection a été peu documenté. Il a été conjecturé, puis montré expérimentalement que ces échelles se trouvent à l'équilibre statistique avec une température effective, et en particulier qu'elles satisfont l'équipartition d'énergie. Une question ouverte est de savoir dans quelle mesure les lois de la thermodynamique et de la mécanique statistique à l'équilibre s'appliquent pour décrire les propriétés des grandes échelles des écoulements turbulents, alors qu'elles se trouvent en interaction avec les petites échelles fortement hors équilibre. Si tel est le cas, cela permettrait de simplifier fortement la modélisation numérique de la turbulence à ces grandes échelles et sa compréhension, avec un grand bénéfice pour diverses communautés en mécanique des fluides, physique statistique, géophysique, astrophysique et sciences de l'ingénieur.

NOUVELLES MÉTHODES NUMÉRIQUES UTILISANT DES ALGORITHMES STATISTIQUES ET MATRICIELS

Le numérique est largement utilisé pour réaliser de l'intégration temporelle ou divers types de simulations numériques (Monte Carlo ou multi-agents, par exemple). Il est cependant utile à bien d'autres fins, par exemple pour trouver, à l'aide d'algorithmes dédiés, des états instables d'un système non linéaire. Actuellement, des algorithmes statistiques (basés sur les événements rares) ou matriciels (itératifs) sont en plein essor, car ils sont plus rapides que les simulations directes ou les simulations Monte Carlo. D'importants progrès et applications sont attendus dans ce domaine à l'avenir.

DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES INTELLIGENTS À L'AIDE DE RÉSEAUX DE NEURONES BIO-INSPIRÉS

Les réseaux de neurones biologiques traitent un nombre énorme de paramètres, bien plus qu'un serveur informatique, tout en consommant beaucoup moins d'énergie. L'étude physique des réseaux de neurones biologiques, vus comme des systèmes complexes et non linéaires, devrait permettre de comprendre comment se font le processus d'apprentissage et les propriétés cognitives du cerveau, et d'utiliser cette compréhension pour améliorer l'intelligence artificielle (aujourd'hui fondée sur un conditionnement par renforcement du type pavlovien) et son efficacité énergétique. On retrouve ici un thème déjà abordé sous l'angle de la physique statistique dans la section précédente.

IMAGERIE ET CAMÉRA NEUROMORPHIQUE

Une application expérimentale très féconde de la technologie des réseaux de neurones biomimétiques concernerait l'électronique centrée sur les événements, typiquement les processeurs et caméras dits «neuro-morphiques». Leur principe est de n'enregistrer que les pixels dont le niveau varie (au lieu de le faire après

l'acquisition à l'aide d'algorithmes de compression). Ces dispositifs pourraient annoncer la prochaine révolution en métrologie des fluides ou en microscopie de localisation à molécule unique, en donnant accès à une résolution spatiale et temporelle décuplées et la possibilité d'enregistrements ultra-résolus sur des temps longs. De tels enregistrements sont indispensables pour l'étude des événements rares et hors de portée des technologies des caméras rapides traditionnelles limitées par la mémoire embarquée. Ces futures plateformes expérimentales aideraient considérablement à améliorer notre sobriété énergétique en devenant moins gourmandes, par plusieurs ordres de grandeur, en besoins de stockage, de transfert de données et de puissance de calcul. Il s'agirait d'une véritable rupture dans notre manière de mesurer les fluides et de coder ou analyser les données. L'approche neuromorphique peut aussi être étendue à la conception de nouveaux ordinateurs dont la structure serait inspirée de celle du cerveau, par exemple sans séparation nette entre support de la mémoire et lieu de calcul. Une telle évolution permettrait de rapprocher l'efficacité énergétique de l'IA de celle du cerveau, comme évoqué dans le paragraphe précédent.

PARTICULES ET FLUIDES INTELLIGENTS

Une amélioration des mesures dans plusieurs champs de physique statistique et non linéaire pourra venir de l'utilisation de fluides ou particules «intelligentes», par exemple les particules qui fluorescent ou changent de couleur en fonction des propriétés locales d'un milieu. Nous pouvons penser au cisaillement local (sur le modèle des peintures développées dans le domaine aérospatial et qui changent de couleur selon le cisaillement pariétal), à la vorticité locale (il existe d  j  de premiers essais de mesure par cette approche), ou encore à la salinité, à la conductivité, au pH, au champ magnétique ou électrique, ou encore à la température. Cette approche est difficile, mais constitue une direction de recherche très prometteuse.

TECHNIQUES DE MESURES SPATIO- TEMPORELLES DE TOPOGRAPHIE D'ONDES DE SURFACE

La métrologie optique joue un rôle central depuis 20 ans dans la physique des fluides. Les laboratoires de recherche ont contribué à développer des outils puissants, comme la vélocimétrie par images de particules (*Particle Image Velocimetry*), qui ont aujourd'hui atteint leur maturité et sont disponibles sous forme libre ou commerciale. Les mesures optiques, résolues en espace et en temps, d'ondes à la surface d'un liquide ou d'un solide en utilisant des dispositifs d'imagerie sophistiqués ont récemment permis de nombreuses avancées expérimentales en dynamique non linéaire. Ces mesures spatio-temporelles pourraient bénéficier, dans les années à venir, de développements comparables à ceux connus pour la vélocimétrie par images de particules. Elles permettraient ainsi de lever des verrous en mécanique des fluides, en

mécanique du solide, ou en physique de l'atmosphère. Parmi les grands défis à relever, on peut citer la mesure spatio-temporelle à grande échelle des ondes à la surface de l'océan.

TECHNIQUES DE MESURES ULTRA-RAPIDES EN OPTIQUE

La mesure ultrarapide en optique est au cœur de nombreuses avancées expérimentales récentes en dynamique non linéaire. Parvenir à des avancées majeures dans ce domaine devrait permettre de débloquer des verrous fondamentaux. Les expériences d'optique, en particulier d'optique fibrée, sont d'extraordinaires applications de la physique des ondes non linéaires. L'imagerie spatiale et temporelle de la phase et de l'amplitude du champ électrique sur des échelles de temps inférieures à 100 femtosecondes représente toujours un défi fondamental de l'optique. Notons enfin, toujours en imagerie, le potentiel de l'utilisation du mélange d'ondes acoustiques non linéaires en vue d'applications industrielles en contrôle non destructif.

COMPOTEMENTS COLLECTIFS : DE LA MATIÈRE ACTIVE AUX DYNAMIQUES DES POPULATIONS EN ÉCOLOGIE

La motivation de l'étude de la matière active est largement biologique : elle vise à comprendre les phénomènes collectifs dans les organismes vivants, à différentes échelles. Les avancées dans la compréhension des propriétés de la matière active ont bénéficié ces deux dernières décennies du développement « d'expériences de physiciens », à savoir des expériences bien contrôlées sur des systèmes modèles simples autopropulsés. Bien que l'inspiration des problématiques issues du monde vivant reste cruciale, ces expériences contrôlées permettent d'aborder d'autres questions comme la mise en évidence de transitions de phase dynamiques, l'émergence de phénomènes collectifs, ou la formation de *patterns* spatio-temporels hors équilibre. Elles visent à étendre le cadre de la physique statistique d'équilibre à de nouvelles classes de systèmes. Nous n'en sommes encore qu'au début de ces approches, qui vont pouvoir s'emparer d'objets variés aux propriétés inédites.

VERS PLUS DE COMPLEXITÉ DANS LES COMPOSANTS ÉLÉMENTAIRES ET LES INTERACTIONS : « MATIÈRE INFORMÉE »

Alors que traditionnellement, la physique statistique considère des assemblées d'entités semblables, l'hétérogénéité des systèmes vivants motive le développement de nouveaux outils théoriques pour étudier des systèmes dont les composants élémentaires présentent une plus grande complexité. Cette complexité peut concerner la structure interne des composants, leurs interactions ou le paysage énergétique dans lequel ils évoluent.

Les développements expérimentaux actuels devraient

permettre d'aborder ce qu'on pourrait appeler la matière informée. Des exemples typiques de matière informée sont les ensembles de minirobots capables d'échanger de l'information au-delà de la simple information de position ou d'orientation, ou bien la matière programmable (typiquement, des assemblages moléculaires synthétiques utilisant les propriétés d'appariement de brins d'ADN complémentaires). Les potentialités de contrôle de ces systèmes expérimentaux devraient être un formidable catalyseur des développements théoriques comme l'ont été les premières expériences de physiciens pour la matière active. L'évolution des possibilités expérimentales permet d'envisager une « révolution haptique », c'est-à-dire la possibilité de transférer en temps réel au macro-monde des informations sensorielles (vision, son, toucher) en provenance du micro-monde ou du nano-monde et en retour, d'agir en direct sur le micro-monde.

DYNAMIQUE DE PARTICULES AUTO-PROPULSÉES À LONGUE PORTÉE D'INTERACTION

La compréhension du transport de particules, qu'elles soient passives ou actives, fait partie des enjeux majeurs des prochaines années. Beaucoup d'études ont déjà été effectuées sur des ensembles non denses de particules, mais les ensembles denses en interaction mutuelle à travers leur sillage et en interaction avec le fluide à cause de leurs propriétés intrinsèques (la densité par exemple) restent toujours un enjeu. S'ajoutent les particules « actives » (autopropulsées) qui ont souvent été étudiées dans des fluides à l'équilibre, mais dont l'étude pour des milieux en mouvement est encore en développement. En particulier, le couplage hydrodynamique de particules auto-propulsées avec des écoulements plus ou moins complexes devrait rester un sujet d'étude majeur. Comprendre l'hétérogénéité de la distribution de microorganismes dans les océans en est un des nombreux enjeux, tout comme la compréhension de la distribution de microorganismes dans le corps ou dans les sols. Dans ces exemples, le couplage entre motilité et écoulement complexe (océanique, sanguin ou dans des milieux poreux) est encore à élucider.

UN DOMAINE PROPICE À LA RÉVOLUTION DES MÉTHODES INVERSES

Dans le champ large des outils offerts par l'intelligence artificielle, les méthodes dites « inverses », permettant d'inférer une modélisation physique de la statistique des degrés de liberté microscopiques issue de grands ensembles de données, deviendront accessibles. Le point de départ sera le savoir acquis lors d'expériences de physiciens très contrôlées sur des systèmes synthétiques, qu'il s'agira d'étendre à des expériences sur des systèmes plus complexes, par exemple vivants. Avec l'émergence d'un cadre général de description des systèmes actifs et de leurs classes d'universalité, il sera ensuite possible de prédire et contrôler leurs propriétés émergentes en partant de l'échelle microscopique.

DYNAMIQUE DES POPULATIONS, ÉCOLOGIE ET ÉVOLUTION : NOUVELLES EXPÉRIENCES, NOUVEAUX CONCEPTS

Les populations d'êtres vivants sont complexes : elles sont constituées d'individus qui interagissent entre eux, sont au contact d'individus d'autres espèces, et sont plongés dans un environnement plus ou moins stable. Elles ont la particularité d'avoir des temps de vie finis, de se déplacer et d'évoluer au cours du temps. Elles peuvent se spécialiser et acquérir des fonctions biologiques ou écosystémiques. Leur étude intéresse de plus en plus de physicien·nes. Il apparaît important d'effectuer des expériences contrôlées (particulièrement en microbiologie, mais d'autres échelles plus petites ou plus grandes devraient suivre). Obtenir des données d'observation avec une bonne résolution spatio-temporelle est également essentiel, par exemple en utilisant des capteurs de mouvements pour des individus mobiles ou des capteurs de présence/absence pour la végétation, ce qui ouvre ensuite la voie à des approches ancrées dans l'analyse des données. La définition des observables pertinentes doit être adaptée à chaque système étudié et à son échelle de mesure ou d'observation. De plus, la notion même d'individu (au sens d'unité élémentaire du système et de sa dynamique) peut être redéfinie, selon que l'on s'intéresse au niveau de la cellule, de l'organisme, de la population ou des communautés d'espèces.

Les notions de trajectoire, d'histoire et de mémoire sont particulièrement importantes en écologie et en évolution où les espèces sont soumises à des contraintes extérieures changeantes et où les conditions initiales jouent un rôle très important. Les mécanismes de sélection, en particulier, sont en général très mal connus. La façon dont ils opèrent peut parfois présenter des analogies avec un mécanisme d'apprentissage, au sens où la façon dont l'écosystème évolue en réponse aux stimuli extérieurs va elle-même évoluer au cours du temps, comme si l'écosystème « apprenait » à évoluer.

En même temps, distinguer la part des contraintes extérieures et celle des interactions spécifiques entre individus ou espèces est un enjeu majeur pour comprendre la dynamique à différentes échelles de temps et d'espace. En cela, l'étude de la réponse d'une ou plusieurs espèces à une perturbation contrôlée fournira des indications précieuses.

Dans l'objectif d'une modélisation unifiée, les outils de physique statistique se révèlent adaptés si le nombre d'espèces est grand, et ceux de la physique non-linéaire pour un petit nombre d'espèces. Un enjeu est d'inventer un nouveau cadre pour inclure plusieurs échelles (par exemple lorsqu'on utilise une représentation du système en termes de graphes). Les hypothèses habituelles de la physique statistique peuvent ne pas être vérifiées, lorsqu'il n'y a que peu de données (par exemple les extinctions) ou pas d'ergodicité (arbre phylogénique), nécessitant de nouvelles approches.

Les questions d'hétérogénéité et de biodiversité sont cruciales à comprendre, dans un cadre biologique où les espèces ne sont pas à première vue distribuées de façon aléatoire, mais plutôt de façon structurée. Le lien entre ces questions et la capacité d'une espèce (ou d'un ensemble d'espèces) à assurer une fonction biologique ou écosystémique commence à être abordé, autant expérimentalement que par des modèles formels, et il constitue un champ de recherches prometteur.

Une dernière direction, encore peu développée, concerne le rôle des propriétés physiques, par exemple le transport des nutriments, des graines ou des odeurs, dans les caractéristiques des réseaux d'interactions entre espèces et l'évolution des fonctions écosystémiques associées.

RECONSTITUTION DE TRAJECTOIRES ÉVOLUTIVES OU HISTORIQUES

Il existe de plus en plus de travaux cherchant à rendre compte des dynamiques évolutives ou historiques à partir de données empiriques. Peut-on dire que Néanderthal a été « éliminé » par notre espèce, ou est-ce avant tout le résultat de changements climatiques ? Quelle est la cause de l'effondrement de la civilisation Maya ? Les travaux sur de tels thèmes font appel à l'exploitation de données variées — archéologiques et climatiques, en particulier. La physique des systèmes complexes pourrait davantage s'investir dans cette problématique au sein de projets interdisciplinaires.

Enfin, de façon générale, l'étude de la matière active permet d'apporter un nouvel éclairage, transdisciplinaire, dans tous les domaines où la question de dynamiques collectives non contraintes par les lois de l'équilibre thermodynamique se pose. C'est le cas, bien sûr, des dynamiques animales, mais aussi des dynamiques de populations, de la robotique en essaim ou des dynamiques cognitives. La physique la matière active sera interdisciplinaire par essence.

PHYSIQUE ET SOCIÉTÉ

DYNAMIQUES SOCIALES : AU-DELÀ DES INTERACTIONS DE PAIRES

La physique statistique permet d'aborder les comportements collectifs rencontrés dans un contexte économique et social à partir de modèles prenant en compte les interactions entre individus et les hétérogénéités individuelles. Cependant, la dynamique d'un groupe social ne se réduit pas à des interactions de paires (entre pairs et par paires) et l'intrication de diverses structures à diverses échelles devra être abordée. Ainsi des macrostructures (sociales, politiques) préexistent aux individus et ont un impact sur leur comportement. Comment articule-t-on ces différents niveaux pour expliquer les comportements des uns et des autres ? Comment peut-on modéliser les dynamiques de ces structures elles-mêmes ? Un changement de para-

digme est nécessaire pour modéliser le comportement des différents types de structures constituant l'organisation sociale, les institutions officielles, les associations ou les entreprises. Une approche basée sur le concept de réseau pourra utiliser la modélisation de systèmes par l'objet appelé hypergraphe en physique et complexe simplicial en mathématiques. Cet objet généralise la modélisation des interactions au-delà des interactions de paires, en considérant des relations entre trois nœuds du réseau (ou plus), au lieu de liens entre seulement deux nœuds. Enfin, un autre aspect essentiel à aborder est le passage d'un comportement collectif (une auto-organisation) à la prise de conscience de cet état par les individus, amenant une rétroaction sur les individus venant de la structure collective émergente, et ainsi la possibilité d'une évolution conjointe des niveaux individuel et collectif. Ce thème touche à celui de l'évolution de notre espèce, avec par exemple l'émergence de la coopération ou du langage.

TRANSITION ÉCOLOGIQUE

La question du développement durable, en tant que problématique scientifique, relève par excellence de la physique des systèmes complexes, du fait des dimensions très variées qu'il faut prendre en compte. Les thématiques à étudier dans ce contexte incluent par exemple la géophysique, les échanges économiques et financiers, l'accès aux ressources, la sécurité alimentaire, l'occupation des sols, les comportements individuels, les flux migratoires induits par le réchauffement, ou encore les mécanismes de décisions aux niveaux nationaux et internationaux. Sur tous ces sujets, des travaux se développent en physique en collaboration avec des géographes, des sociologues, des économistes ou des historiens, grâce à l'accès à de grandes quantités de données et la capacité des modèles physiques à envisager la diversité des échelles de temps impliquées.

VILLES ET TERRITOIRES

Plus de 50 % des habitants sur Terre habitent en milieu urbain. Mieux comprendre la dynamique des villes pourrait permettre de concevoir des villes moins énergivores et moins polluantes, et de limiter les phénomènes de ségrégation sociale. Cette étude concerne à la fois la dynamique des structures urbaines (évolution des réseaux de rues et de transport, occupation des sols...), les répartitions socio-économiques des habitants (questions de ségrégation sociale, lieux d'habitation par opposition aux lieux de travail), les comportements collectifs en milieu urbain (*patterns* de mobilité, mouvements de foules, mouvements sociaux, propagation d'émeutes) et les questions sanitaires (propagation d'épidémies en prenant en compte les hétérogénéités des interactions sociales et des comportements individuels, interaction avec les questions de mobilité). Tous ces sujets sont à aborder à l'échelle d'une ville, d'un ensemble de villes («compétition» entre villes, dynamiques de croissance, rôle des flux migratoires), à différentes échelles (le périmètre ur-

bain étant mal défini, des approches multi-échelles ont été montrées plus pertinentes). La ville c'est aussi l'équilibre ou le déséquilibre ville/territoire, et les interactions en matière de flux — flux migratoires, flux économiques, flux financiers.

Là encore, la démarche de la physique, combinant analyse de données empiriques, modélisation, simulation et expérimentation, apporte une expertise pour nourrir la discussion citoyenne et politique sur les décisions à prendre dans le contexte du changement climatique et des crises sociales urbaines.

MOBILITÉS, TRANSPORT ET RÉSEAUX DANS L'ESPACE PHYSIQUE

L'aménagement des mobilités est crucial tant pour la sécurité que pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Un gros champ de travail sera l'intégration des différents modèles de transport pour en décrire toutes les échelles et tous les modes (piétons, vélos, véhicules, trains). Le couplage des modèles de transport à d'autres facteurs, par exemple à des modèles épidémiologiques, ou de plus en plus, à des modèles de pollution ou d'émissions de CO₂, devrait également se développer.

Le couplage entre réseaux (énergie et eau potable, par exemple) est primordial. La stabilité des réseaux électriques pose des problèmes complexes. La physique statistique a déjà contribué à la compréhension du maintien de la fréquence du réseau électrique à 50 Hz (quels que soient la consommation et les événements affectant la production) via l'utilisation de modèles type Kuramoto, et elle peut participer à une meilleure gestion des énergies intermittentes. L'effondrement d'un réseau comme celui de l'énergie peut induire l'effondrement d'un autre, tel celui des communications. L'étude des interactions entre réseaux progresse grâce à l'introduction de réseaux multicouches, plus particulièrement les multiplexes, par exemple pour l'étude des systèmes de transport urbain.

Concernant la dynamique de foules, l'explosion des mesures de terrain rendues possibles par l'IA offre de nouvelles possibilités de modélisation. Mais le plus fort impact de l'IA est à venir, par sa capacité à rendre compte de la complexité et de l'hétérogénéité des foules. Aux fortes densités, on s'attend à un apport très important de l'apprentissage automatique pour détecter des anomalies dans les flux, voire prévenir avec quelques secondes ou minutes d'avance des mouvements de foules incontrôlés.

Plus généralement, la compréhension des foules à haute densité n'en est qu'à son début et gagnera à intégrer les études biomécaniques de locomotion qui commencent tout juste à considérer les contraintes liées à la densité (risque de chute, par exemple). Au-delà d'une approche purement mécanique, il faudra prendre en compte les capacités des piétons à anticiper leur mouvement, même à haute densité, et à remodeler les liens sociaux (émergence de leaders, rôle de l'information).

DÉMOCRATIE : DYNAMIQUES D'OPINION, DÉSINFORMATION

Les études de la dynamique d'opinion vue comme un système dynamique complexe ont eu un très grand succès pour montrer comment une version simplifiée des interactions locales entre les acteurs sociaux peut produire des structures globales qui reproduisent qualitativement des régularités observées dans les systèmes réels. Quelques exemples emblématiques sont le modèle de Schelling pour la ségrégation, ou le modèle d'Axelrod pour la persistance de la diversité culturelle en présence d'interactions locales qui tendent à l'homogénéisation. Aujourd'hui, l'explosion du nombre d'études empiriques, grâce à l'énorme masse de données apportée par les plateformes qui gèrent les différents réseaux sociaux, ouvre la possibilité de calibrer les modèles sur ces données empiriques. L'un des enjeux majeurs est l'analyse des dynamiques de propagation de *fake news*, et plus généralement de désinformation, sur les réseaux.

PRODUCTION DE DONNÉES, ACCÈS AUX DONNÉES

Le couplage expérimentation/modélisation est au cœur de la physique. Des freins réglementaires limitant l'accès aux données ont longtemps pénalisé la recherche française sur les mobilités, mais la tendance est à une ouverture de plus en plus large des données. Les progrès récents du suivi automatique par IA, qui peut par ailleurs poser des questions de protection des libertés, facilitent beaucoup les observations en milieu réel.

Concernant les sciences de la société, l'accès aux données est devenu plus facile, mais il reste souvent un obstacle important. L'expérimentation s'est également développée (économie comportementale, expérience de mesure de dynamiques de réseaux dans des contextes particuliers). Diverses initiatives conduisent à la mise à disposition de données en sciences sociales (projet *Humanum* par exemple), et l'accès à des données empiriques de sources variées (données d'organismes publics, données de santé, données d'enquêtes) va devenir encore plus facile, mais il faut que la physique s'implique pour que le stockage des données soit compatible avec leur exploitation quantitative. Par exemple, il est essentiel d'avoir accès à des données non agrégées. La physique doit aussi continuer d'innover pour produire des données — voir par exemple l'expérimentation sur les vols d'étourneaux, ou celles sur les mesures d'interactions dans les écoles ou à l'hôpital en vue d'affiner les modèles épidémiologiques.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

DÉVELOPPEMENT D'UNE EXPERTISE POUR LES CITOYENS

La physique peut occuper une place assez centrale, au carrefour de plusieurs disciplines et de nombreux défis

sociétaux à venir (sobriété énergétique, climat, IA...). Les possibilités de modélisations calibrées sur des données empiriques permettent à la physique de se positionner pour développer des expertises sur de nombreux sujets au profit des citoyens, des collectivités, des organisations ou de l'État. Il s'agit de promouvoir une culture scientifique, amenant une réflexion qui ne soit pas purement théorique ou idéologique, mais ancrée sur des données empiriques fines. Cela doit évidemment se faire en interaction avec d'autres disciplines, et la physique des systèmes complexes a une expérience d'interdisciplinarité qui peut être particulièrement précieuse.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

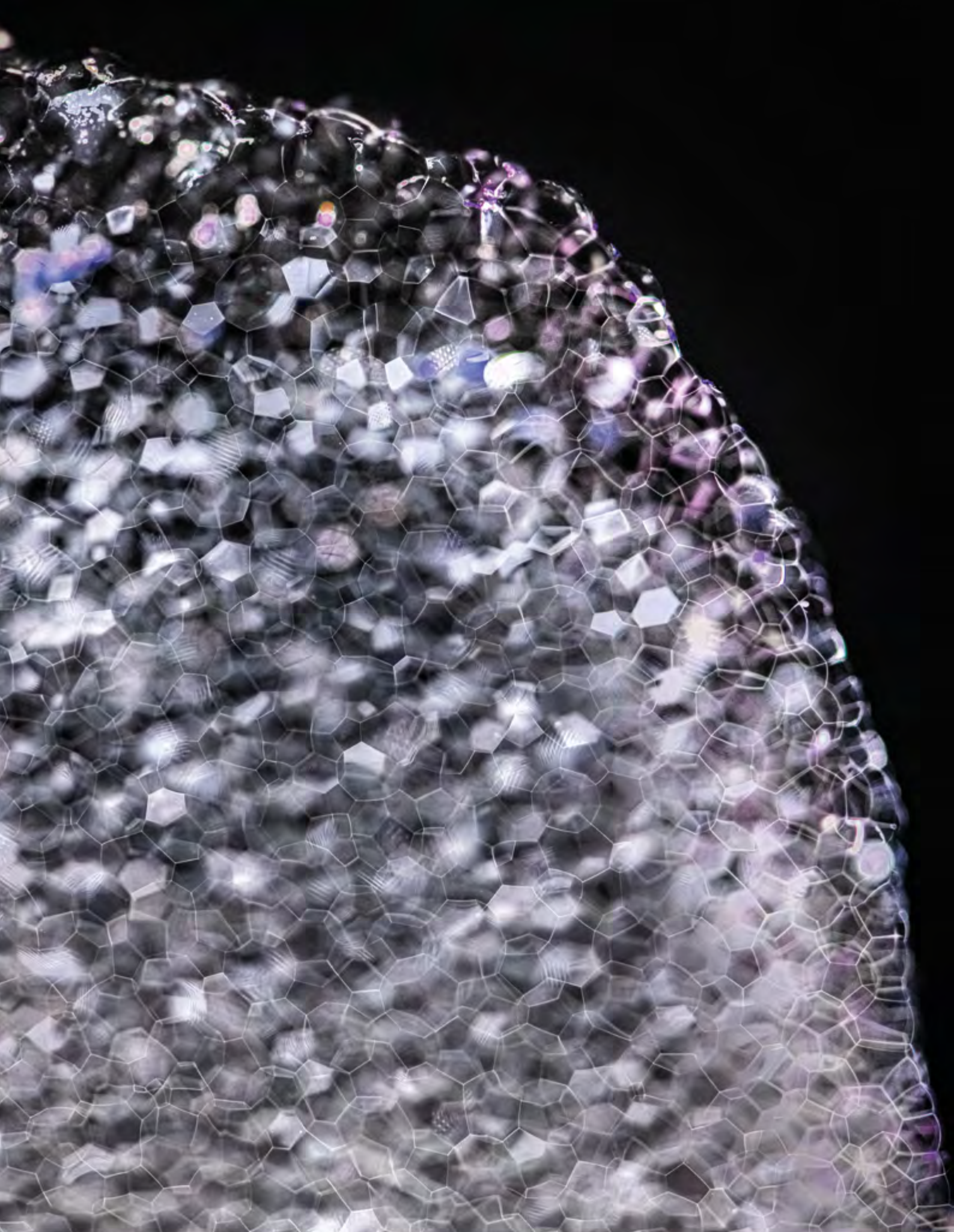
L'IA apparaît au détour de beaucoup des thèmes abordés, sous des formes très variées : souvent comme outil, mais également comme objet d'étude, voire comme objet de crainte, y compris de la part de ceux qui ont contribué à son développement. La physique a des outils pour contribuer aux débats de société qui s'annoncent, et aider à faire évoluer l'IA dans un sens bénéfique pour la société.

LA NOTION DE MODÈLE VA-T-ELLE ÉVOLUER EN PHYSIQUE ?

La notion de modèle est différente d'une discipline à l'autre. Au sein de la physique, différents niveaux de modélisation coexistent et se complètent : modèles «jouets», c'est-à-dire modèles minimaux cherchant à ne considérer que les ingrédients nécessaires pour expliquer un phénomène, ou modèles plus complexes calibrés sur des données pour des comparaisons avec des données empiriques. Dans tous ces cas, les modèles reposent sur une formulation mathématique explicite. L'utilisation des outils du domaine de l'IA conduit à des modèles hybrides, incluant des boîtes noires. Quel statut accorder à ces modèles ? Il semble en tout cas important pour le débat de société de ne pas utiliser le terme de modèle dans le cas d'approches entièrement basées sur des boîtes noires. Il est également important de ne pas confondre les modèles physiques et de simples schémas visualisant des hypothèses de travail ou les conceptions de leurs auteurs.

Ci-contre: Dunes longitudinales reproduites expérimentalement dans l'eau. © Sylvain COURRECH DU PONT/Université Paris Cité/CNRS Images





Physique de la matière complexe

RÉSUMÉ

Historiquement centrée autour de la matière molle, la matière complexe s'est largement diversifiée depuis une dizaine d'année, s'intéressant à une très grande variété d'objets à toutes les échelles, du moléculaire au macroscopique. Ces objets ont des origines variées, allant de la science des matériaux jusqu'au vivant, posant des questions de structure, de dynamique, à la frontière avec beaucoup d'autres disciplines.

Les toutes petites échelles sont celles où les **effets chimiques, moléculaires, voire quantiques** jouent un rôle clé, pouvant avoir une influence notable aux échelles plus grandes. De nouveaux outils et concepts sont en plein développement, et les **effets de confinement** observés à ces échelles pourraient avoir des retombées, dans le cadre de la physique fondamentale et dans de nombreuses applications.

La question de la **remontée des échelles** combinant le passage du microscopique au mésoscopique, et du mésoscopique au macroscopique est un enjeu majeur de la physique de la matière complexe. Ces liens entre les échelles ouvrent en particulier la voie pour aller au-delà de la phénoménologie de certains modèles macroscopiques, intégrer le rôle du désordre, et aborder la transition entre systèmes sensibles aux fluctuations thermiques et systèmes athermiques. Si dans le passé de nombreux phénomènes ont été bien compris lorsqu'ils étaient pris de façon isolée (changement de phase, transfert thermique, mécanique), la **prise en compte des couplages multiphysiques**, où la complexité émerge de la forte sensibilité de ces couplages souvent non linéaires, représente un défi pour l'avenir.

Les équations étant établies, les **simulations numériques** sont ici un outil puissant en plein essor, ouvrant de nouvelles possibilités. Face à un espace des phases extrêmement vaste, dont l'exploration complète est inenvisageable, les **approches physiques de simplification**, typiques de la matière complexe, sont particulièrement efficaces et complémentaires des approches numériques.

Un autre défi porte sur l'**élaboration de nouveaux matériaux aux structures contrôlées** permettant de nouvelles fonctions à la demande. La recherche autour des **métamatériaux** aux propriétés statiques et dynamiques étonnantes est l'objet d'un foisonnement créatif remarquable.

Enfin, la physique de la matière complexe est centrale pour **aider à la compréhension du vivant** et de **s'en inspirer**. Étudier la dynamique

et les mécanismes en jeu dans le vivant fournira des perspectives précieuses pour la conception de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux.

Déjà actuellement, et plus encore dans l'avenir, la physique de la matière complexe sera **une physique à l'interdisciplinarité assumée** avec de forts liens avec la chimie, la biologie ou les géosciences. Un second point commun entre ces défis est leur proximité avec les enjeux sociétaux modernes, que ce soit la santé ou la transition énergétique. Le va-et-vient continu entre la volonté de répondre à des questions pratiques et le développement de questions fondamentales nouvelles est une caractéristique forte de la communauté.

Physique de la matière complexe

La matière complexe, un domaine de recherche au cœur de l'humain. Nous avons convergé vers ce qualificatif très large qui reflète à la fois la motivation des collègues en phase avec les défis sociétaux d'aujourd'hui, et la difficulté que nous avons rencontrée à tenter de définir le domaine. Historiquement centrée autour de la matière molle, la matière complexe s'est largement diversifiée, s'intéressant à une très grande variété d'objets à toutes les échelles, du moléculaire au macroscopique, issus de la science des matériaux jusqu'au vivant, posant des questions de structure, de dynamique, à la frontière avec beaucoup d'autres disciplines.

Nous avons choisi d'organiser ce chapitre autour de cinq défis principaux :

— Le premier concerne **les toutes petites échelles**, où les effets chimiques, moléculaires, voire quantiques jouent un rôle clé, pouvant avoir une influence notable aux échelles plus grandes. De nouveaux outils et concepts sont en plein développement, et les effets de confinement observés à ces échelles pourraient avoir des retombées, dans le cadre de la physique fondamentale et dans de nombreuses applications.

— Le deuxième pose la question de **la remontée des échelles** du passage du microscopique au mésoscopique, et du mésoscopique au macroscopique. Ces liens entre les échelles ouvrent en particulier la voie pour aller au-delà de la phénoménologie de certains modèles macroscopiques, intégrer le rôle du désordre, et aborder la transition entre systèmes sensibles aux fluctuations thermiques et systèmes athermiques.

— Le troisième est celui des **couplages multiphysiques**, où la complexité émerge de la présence simultanée de phénomènes bien compris lorsqu'ils sont abordés isolément (changement de phase, transfert thermique, mécanique...) et de la forte susceptibilité des systèmes. Les équations étant établies, les simulations numériques sont ici un outil puissant en plein essor, ouvrant de nouvelles possibilités. Face à un espace des phases extrêmement vaste, dont l'exploration complète est inenvisageable, les approches physiques de simplification, typiques de la matière complexe, sont particulièrement efficaces et complémentaires des approches numériques.

— Le quatrième porte sur **l'élaboration de nouveaux matériaux** aux structures contrôlées permettant de nouvelles fonctions à la demande. La recherche autour des matériaux aux propriétés statiques et dynamiques étonnantes est l'objet d'un foisonnement créatif remarquable.

— Le cinquième et dernier défi est de participer à la **compréhension du vivant pour s'en inspirer**. Les sys-

tèmes biologiques sont une source de problèmes infinis pour la matière complexe et permettent de développer des outils et concepts physiques dont la portée va bien au-delà du sujet d'inspiration initial. Étudier leur dynamique et les mécanismes en jeu fournira des perspectives précieuses pour la conception de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux.

Ces cinq défis ne couvrent bien évidemment pas la totalité des recherches à venir dans le domaine de la matière complexe, mais nous semblent refléter la richesse des recherches en devenir. Ils illustrent également plusieurs grandes lignes qui nous semblent guider le futur de la matière complexe. Premièrement, ils se situent tous au cœur d'une interdisciplinarité assumée avec de forts liens avec la chimie, la biologie ou les géosciences. De nouveaux outils se développent à l'interface entre ces disciplines et la physique, faisant émerger de nouvelles questions. Un deuxième point commun entre ces défis est leur proximité avec les enjeux sociétaux modernes, que ce soit la santé ou la transition énergétique. Dans ce dernier notamment, la nécessité d'optimiser les procédés industriels qui utilisent à foison des matériaux complexes (polymères, mousses, granulaires, suspensions, colloïdes) impose une compréhension approfondie des comportements dans de nouveaux domaines de paramètres, imposés par de nouvelles contraintes. Enfin, malgré la diversité des objets étudiés dans ces défis, on retrouve dans ces recherches une méthodologie et une approche commune. Le va-et-vient continu entre la volonté de répondre à des questions pratiques et le développement de questions fondamentales nouvelles est une caractéristique forte de la communauté. Une « école française » de la matière complexe est bien identifiée à l'étranger, avec un positionnement méthodologique souvent original, source à la fois de créativité et de compréhension, un aspect stimulant l'autre : la volonté de trouver des systèmes simplifiés, de décortiquer les phénomènes physiques quitte à explorer l'espace des phases en dehors des points de fonctionnement des applications est un point fédérateur de la communauté. Cette exploration plus vaste que celle guidée par des retombées applicatives immédiates rend sur le long terme la physique de la matière complexe indispensable à certaines innovations.

UNE NOUVELLE PHYSIQUE AUX ÉCHELLES MOLÉCULAIRES : UNE INTERFACE AVEC LA CHIMIE

Notre compréhension du comportement de la matière

complexe aux échelles nanométriques, au voisinage des interfaces, en particulier aux interfaces liquide/solide, est en évolution rapide. L'accès expérimental récent à ces échelles permet de sonder la matière en écoulement lorsque les effets de taille finie, les fluctuations, ou les forces intermoléculaires, associés à la prépondérance de surfaces, deviennent dominants. Ces effets originaux liés à la présence de parois sont en particulier observés à la surface de particules micro ou nanométriques, ou en situation d'écoulements ultraconfinés, qu'ils soient technologiques ou naturels. À titre d'illustration, en lien notamment avec des problématiques de développement durable et de santé, la filtration des eaux usées, la désalinisation de l'eau de mer et la récupération de l'énergie bleue nécessitent un contrôle précis du mouvement d'ions et de molécules au travers de canaux micro- ou nano-fluidiques; le stockage et les flux de dioxyde de carbone dans des matrices poreuses couplent un transport fluide et des réactions chimiques impliquant cette molécule; enfin de nombreux micromoteurs essentiels à la vie, comme la pompe à protons dans nos cellules ou le moteur flagellaire des bactéries, fonctionnent grâce à un flux dirigé de molécules. Des avancées majeures sont attendues dans la maîtrise et la compréhension de ces processus et, les échelles moléculaires étant atteintes, les échanges avec la chimie seront un point clé. Ce domaine repose sur l'avènement récent de techniques de fabrication; manipulation et caractérisation aux échelles nanométriques continueront à se développer, comme l'appareil à forces de surface (SFA) ou le microscope à force atomique (AFM), utilisés en particulier dans des modes dynamiques. Ils permettent de quantifier les interactions moléculaires, chimiques impliquant des parois ou des interfaces (solides, goutte/goutte, particule/particule).

Cette révolution expérimentale se poursuit désormais vers la caractérisation de processus dynamiques aux échelles moléculaires. Une des voies de développement que nous anticipons repose sur des méthodes optiques. Les méthodes de fluorescence permettent de mieux en mieux de suivre la dynamique de molécules uniques, souvent polymériques, mais avec des perspectives fortes vers les petites molécules et atomes, allant jusqu'au transport de quelques molécules d'eau et à la dynamique de charges sur une surface. Les techniques de caractérisation de type génération d'harmonique du second ordre (SHG) ont une sensibilité qui est spécifique aux effets de surface et sont, de ce fait, un outil clé dans ce domaine. Leur pleine exploitation, encore très difficile, permettra de collecter des informations nouvelles.

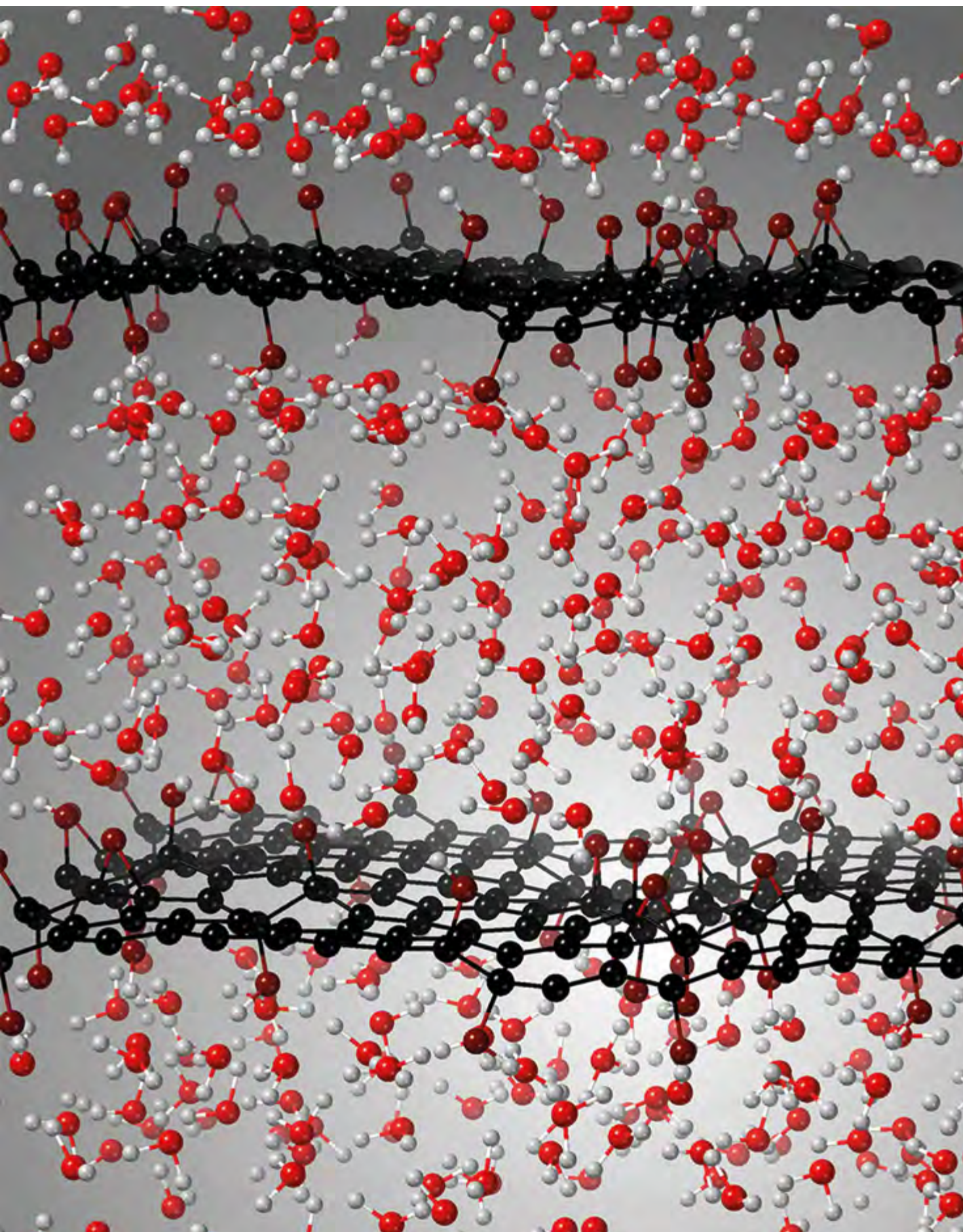
Atteindre les échelles moléculaires, voire atomiques, nécessite de prendre en compte, de façon très nouvelle dans ces problématiques hors équilibre, la chimie et *in fine* les effets quantiques. Ainsi, il a été montré récemment que la friction et l'écoulement d'un liquide sont, pour un système particulier, déterminés par le mouvement des électrons du solide au contact avec le liquide. Cela laisse espérer une compréhension de la matière complexe en mouvement par des approches accessibles habituellement unique-

ment à l'échelle d'une molécule isolée dans le cadre de la chimie théorique, ou dans le cadre de la matière condensée «dure». Un champ de réflexion nouveau est ainsi ouvert, dans lequel les données expérimentales seront interprétées avec une vision théorique renouvelée, et un support numérique multi-échelle innovant. Une classe de problèmes associée à cette «physique moléculaire» peut maintenant être traitée par des approches atomistiques de type *ab initio* et par leur intégration dans la modélisation de systèmes d'intérêt, *via* par exemple l'utilisation de *machine learning* pour la définition de potentiels effectifs ou de champs de force réactifs. Les champs de force réactifs sont particulièrement importants pour modéliser des réactions chimiques, mais également pour modéliser la dynamique de charges de surfaces qui sont au centre des propriétés de transport dans certains systèmes nanofluidiques fondamentaux.

Le développement de ces outils expérimentaux et théoriques apportera des réponses à des questions fondamentales, parfois anciennes, telles que les distributions de charges de surface, le mouillage, les transitions de phase confinées, le transport au voisinage des surfaces. Ces avancées mettent également en évidence des phénomènes nouveaux, laissant actuellement entrevoir l'émergence d'une nouvelle physique, faisant le lien entre les échelles chimiques ou moléculaires et les échelles mésoscopiques ou macroscopiques, dans des situations dynamiques. Nous évoquons ci-dessous quelques défis, identifiés par la communauté dans ce domaine, qui pourraient être relevés avec succès dans les années à venir.

SÉLECTIVITÉ/SPECIFICITÉ : TRIER EFFICACEMENT LES MOLÉCULES ?

Les phénomènes originaux ou d'intérêt dans les systèmes confinés mettent souvent en jeu la notion de sélectivité. C'est particulièrement le cas dans les fonctionnalités d'inspiration biologique ou les problématiques de filtration ou de récupération d'énergie, où il s'agit par exemple de discriminer deux ions très similaires, tels que le potassium K^+ et le sodium Na^+ . Dans ce domaine, la polyvalence, la finesse de la sélectivité et l'efficacité de transport des systèmes vivants posent un défi à la fois théorique et expérimental: leurs propriétés ne sont ni prédites par les modèles, où seules les interactions élémentaires stériques ou électrostatiques sont exploitées, ni reproduites par les systèmes synthétiques, à base de nanotubes par exemple. Les approches numériques tous-atomes de ces questions reproduisent certains des phénomènes, au prix d'un coût numérique prohibitif, mais peinent à faire ressortir des règles génériques transposables. Il y a donc un vrai enjeu pour la physique qui devra élaborer, sur la base des progrès récents expérimentaux et numériques, un cadre conceptuel, probablement basé sur une vision dynamique de la sélectivité, afin de traiter des systèmes plus complexes et plus performants pour sélectionner des particules, des molécules ou des ions individuels et optimiser les compromis entre l'efficacité de transport et la sélectivité.



Modèle de feuillets d'oxyde de graphène dans l'eau. © Marie-Laure BOCQUET / PASTEUR / ENS / CNRS Images

IONTRONIQUE ET EFFETS DE CHARGE AUX PETITES ÉCHELLES

Un champ important de la matière confinée, qui dérive du domaine ancien des phénomènes électrocinétiques, mais qui trouve des échos très contemporains autour des batteries et des applications à la génération d'énergie, traite du transport ionique dans les fluides. Dans ce cadre, l'iontronique, i.e. le transport ionique confiné, explore la possibilité de reproduire des fonctionnalités électroniques traditionnelles dans les systèmes fluidiques (diodes ioniques, transistors, portes logiques). Les fonctionnalités ioniques ne sont cependant pas limitées à cette analogie directe, car de nouvelles possibilités apparaissent du fait de la grande variété de la nature des porteurs des charges — il existe de nombreux ions différents alors qu'il n'existe qu'un seul électron — et de la nature de leur transport, pas uniquement électrique, mais également convectif ou phorétique. Toutes ces fonctionnalités encore peu explorées sont autant d'opportunités pour moduler et optimiser les processus de charge et de décharge associés aux applications dans l'énergie. D'une façon générale, les approches théoriques et expérimentales du transport des électrolytes et des liquides ioniques en situation confinée ou au voisinage de parois seront stimulées par ces besoins nouveaux.

UNE PHYSICO-CIMIE CONFINÉE

Dans les systèmes quantiques impliquant des molécules en cavité, un nouveau champ de recherche émerge : la chimie contrôlée par le confinement. Schématiquement, un contrôle de la taille de la cavité permet d'accorder les niveaux d'énergie du champ électromagnétique dans la cavité. Puisque les états atomiques/moléculaires se couplent à ce champ, cela peut permettre de modifier le niveau d'états réactionnels intermédiaire (dits « de transition »), et ainsi contrôler finement la cinétique d'une réaction chimique, allant au-delà des progrès récents en catalyse mono-atome.

Le confinement peut également avoir des effets dramatiques sur les transitions de phase. Les films minces polymériques présentent des propriétés particulières que l'on peut commencer à sonder expérimentalement. La transition vitreuse dans ces films est modifiée et des films vitreux minces ultrastables sont observés, dont la caractérisation et la modélisation sont en cours.

RÉPONSE DYNAMIQUE, FLUCTUATIONS ET SIGNAUX FAIBLES DANS LE BRUIT

Un élément du traitement actuel des effets dynamiques aux petites échelles est la dichotomie entre les interactions, abordées du point de vue statique, et les phénomènes de transport, par nature dynamiques, pilotés par ces interactions. Cela occulte la possibilité d'une rétroaction des effets dynamiques sur les interactions : la multivalence des interactions, les fluctuations de l'environnement, des propriétés et des formes des frontières,

l'aspect dynamique de charges de surface ou de volume et leur possible couplage à l'écoulement (par triboélectricité par exemple) sont des directions pour dépasser le paradigme actuel et repenser les écoulements au voisinage immédiat des surfaces. Les progrès dans ce domaine s'appuieront sur une maîtrise expérimentale généralisée des aspects dynamiques, en particulier avec l'usage de surfaces dont on peut par exemple moduler, dans l'espace et dans le temps, la charge, l'adhésion, etc.

La réponse dynamique est intimement liée, à ces petites échelles, à la prépondérance de fluctuations, mécaniques ou chimiques, qui déterminent le transport macroscopique. Une meilleure compréhension des fluctuations d'origine thermique, dans ces conditions hors équilibre et proches de parois, sera indispensable. On peut aujourd'hui observer ces fluctuations, dans l'espace ou dans le temps, avec suffisamment de statistique pour détecter des événements rares, comme la présence de molécules ou d'espèces en faible concentration. Les mesures nécessaires restent un défi expérimental : les signaux d'intérêt sont complexes, car ils sont de très faible amplitude et résultent de phénomènes physiques souvent imbriqués. L'interprétation et le traitement statistique de signaux faibles, dans le bruit, représentent donc également un des enjeux clés.

REMONTER LES ÉCHELLES : L'ÉMERGENCE DES PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES DE LA MATIÈRE COMPLEXE

La matière complexe est intrinsèquement multi-échelle, les propriétés résultant d'un pont entre les échelles microscopiques, où les effets chimiques, moléculaires, et parfois mêmes quantiques jouent un rôle clé (voir 1), vers les échelles macroscopiques, typiquement l'échelle humaine à laquelle la matière complexe est traitée comme un milieu continu, en passant par les échelles mésoscopiques auxquelles s'organise la structure de la matière complexe. Ces changements d'échelle introduisent des difficultés intrinsèques. Les fluctuations associées au grand nombre d'éléments et aux grandes échelles, ainsi que la présence de désordre et d'hétérogénéités, conduisent à l'émergence d'effets spécifiques, qui ne se déduisent pas simplement des effets microscopiques, par homogénéisation par exemple.

Les progrès récents dans le domaine devraient permettre d'améliorer notre prise en compte des différentes échelles. Ils ouvrent en particulier des pistes pour apporter des éléments de réponse aux quelques questions ouvertes détaillées ci-dessous, spécifiques des problèmes multi-échelle.

APPRÉHENDER LA GRANDE GAMME D'ÉCHELLES

Le passage d'une échelle à une autre ne peut pas s'appuyer uniquement sur des expériences et des approches théoriques à des échelles disjointes. Des échelles intermédiaires, encore mal comprises, peuvent émerger (e.g.

sous-structures de dislocations dans les métaux et alliages, longueurs de corrélation dans les amorphes) et il est fondamental de développer des outils multi-échelle expérimentaux et de développer les concepts théoriques permettant d'intégrer dans un même cadre des informations obtenues à des échelles très différentes. Les progrès du côté expérimental sont en plein essor, avec la mise au point de techniques capables d'acquérir de multiples signaux en même temps et à des échelles différentes, tout en parvenant à les corréler. Intégrer deux signaux d'entrée simultanés est un défi, technique d'abord, mais également d'analyse des données, qui sont non seulement plus nombreuses, mais doivent être reliées de façon pertinente. Un exemple est le développement de sondes fluorescentes moléculaires ou de sondes colloïdales dont l'observation à l'échelle locale est synchronisée avec l'observation d'une dynamique d'ensemble à l'échelle macroscopique. Citons les problèmes de l'avancée d'une fracture ou du cisaillement d'un fluide complexe. Ces développements expérimentaux devront avancer en concertation avec des développements théoriques et numériques notamment pour l'interprétation physique des signaux. La question du multi-échelle se pose en effet également en simulation où des liens entre échelles doivent être faits, impliquant le passage de l'*ab initio* aux potentiels effectifs de dynamique moléculaire et des modèles gros grains aux modèles continus, ce qui représente un nœud méthodologique important pour l'avenir.

COMPRENDRE LA PHÉNOMÉNOLOGIE DE LA MATIÈRE COMPLEXE ET ALLER AU-DELÀ

Devant la difficulté de remonter les échelles, l'approche continue des matériaux complexes, tentant de proposer des lois de comportements fondées sur les lois fondamentales et sur des paramètres mesurés, reste très dynamique dans la communauté. Les progrès récents sur des matériaux modèles ouvrent la voie à des études sur des systèmes plus complexes d'un intérêt certain pour les applications et qui mettent en jeu des hétérogénéités ou des interactions plus riches (poudres, mousses de fluides complexes, milieux fibrés enchevêtrés, gels complexes). Ces études macroscopiques s'ouvrent également aujourd'hui de plus en plus vers des géométries d'écoulements ou de sollicitations plus complexes, plus réalistes, non restreintes aux simples tests de cisaillement plan ou d'essai de traction. L'étude des intermittences, des hétérogénéités d'écoulement, des effets de confinement est en plein développement et ne manquera pas de révéler tout un pan d'une nouvelle phénoménologie.

Un autre grand défi en lien avec la problématique du multi-échelle discutée ci-dessus reste d'aller au-delà de la phénoménologie, et de comprendre et prédire les coefficients de transport introduits dans les modèles continus à partir de la connaissance des interactions microscopiques. Des avancées théoriques et expérimentales sur les interactions entre les constituants élémentaires des fluides complexes (gouttes, particules, colloïdes) sont actuellement obtenues grâce à des techniques avancées

(AFM, pinces optiques...) qui laissent espérer la construction d'un lien quantitatif entre les interactions entre deux objets, à l'échelle nanométrique ou micrométrique et la réponse rhéologique globale. Cela ouvre un champ de contrôle et de prédiction des paramètres décrivant le comportement macroscopique de la matière.

LES MILIEUX FAIBLEMENT THERMIQUES

Les matériaux complexes sont généralement classifiés en deux catégories : celle des matériaux athermiques, dont les constituants de la structure mésoscopique sont plus grands que l'échelle où les fluctuations thermiques se font sentir et celle des matériaux thermiques, avec des constituants browniens. Ces deux limites sont habituellement étudiées dans des cadres théoriques disjoints. À la transition d'un cas à l'autre, les fluctuations thermiques peuvent être traitées comme de faibles perturbations dans un système qui reste néanmoins piégé dans un état hors équilibre. Ce thème de recherche est en plein développement théorique, numérique et expérimental et devrait voir éclore des comportements nouveaux.

APPRÉHENDER LE RÔLE DU DÉSORDRE ET DES FLUCTUATIONS

Un des verrous pour remonter les échelles dans les matériaux complexes est la présence de désordre et de fluctuations hors d'équilibre. Malgré de nombreuses avancées dans notre compréhension des transitions vitreuse et de blocage, ces questions fondamentales et difficiles restent en partie ouvertes. Considérant par exemple les matériaux amorphes, comprendre les processus de relaxation et de vieillissement à partir de la physique aux échelles des entités élémentaires, leur implication sur la rhéologie, le fluage, la ténacité des matériaux, demeure un vrai défi. Le comportement de ces milieux encombrés et désordonnés est en effet contrôlé par des événements rares, les hétérogénéités les plus fragiles induisant une dynamique complexe. Ces questions se rapprochent des problématiques de calcul de risques, de dimensionnement, de durabilité. Faire ainsi le lien entre des questions de physique fondamentale et des questions industrielles ou sociétales devient un véritable enjeu.

Concernant le désordre, les sources d'innovation futures semblent être des stratégies pour ne plus subir, mais pour contrôler voire exploiter le désordre. Dans cette lignée, l'étude du rôle des défauts est en plein renouveau. Les concepts initialement développés dans les cristaux liquides se trouvent être pertinents dans les matériaux complexes, notamment pour les milieux biologiques actifs, mais également pour les métamatériaux où les défauts peuvent mettre à mal les fonctionnalités visées.

APPRÉHENDER LES COUPLAGES MULTIPHYSIQUES : UN SOUTIEN POUR LA SIMULATION INTENSIVE ?

La complexité peut également émerger d'un grand

nombre de couplages multiphysiques différents. Les systèmes multiphasiques ou réactifs hors équilibre sont particulièrement représentatifs de cette classe de complexité, et la prédiction de leur dynamique, bien que souvent basée sur des équations connues et bien établies, constitue un défi. Les matériaux concernés sont au cœur d'une multitude de problématiques industrielles ou environnementales et les processus les impliquant résultent le plus souvent d'une longue optimisation empirique. Une approche physique, par nature générique, simplifiée, souvent analogique, est indispensable à la constitution d'une intuition fiable des processus en jeu et à l'exploration éclairée des espaces de paramètres de grande dimension engendrés par ces systèmes. L'efficacité de cette approche est renforcée par les progrès des simulations numériques : l'approche physique positionne le problème posé dans la zone pertinente de l'espace des paramètres, et réduit le nombre de variables impliquées dans le problème ; la résolution numérique devient alors, dans certains cas, accessible et permet de valoriser pleinement la réduction de complexité obtenue, en donnant accès à une prédiction quasi-exacte du phénomène, utilisable en pratique. C'est un domaine qui se base sur l'expertise en physique macroscopique de la communauté française (hydrodynamique, mécanique physique...), et dans lequel les avancées se font en lien fort avec les besoins sociétaux. Nous donnons ci-dessous plusieurs exemples de systèmes multiphysiques à l'échelle macroscopique comme aux petites échelles.

LES COUPLAGES MULTIPHYSIQUES DANS LES SYSTÈMES MACROSCOPIQUES

Aux échelles macroscopiques, les phénomènes sont régis par des équations différentielles connues : la difficulté est alors l'identification des couplages dominants, permettant une analyse du processus d'intérêt. Les processus physiques en jeu, souvent nombreux, peuvent être les changements de phase, les déformations élastiques, les écoulements, les effets de parois, les réactions chimiques, les effets thermiques, les effets Marangoni. Dans les applications industrielles, les besoins en compréhension fondamentale sont nombreux : citons le comportement des bulles aux électrodes d'une batterie, la moussabilité d'une solution de surfactant, les processus de transport et de mélange dans les milieux poreux, les changements de phase dans des fluides en écoulement, les suspensions et milieux divisés. Le domaine des solides ultra-mous, dont le module élastique peut descendre jusqu'à la centaine de pascals, se développe également très rapidement, stimulé par les besoins en bio-ingénierie tissulaire et en robotique molle. Des questions de physique fondamentale nouvelles y apparaissent, couplant phénomènes de mouillage, de poro-élasticité, d'adhésion, de contrôle de forme.

Les bouleversements industriels actuels, liés aux changements de sources d'énergie ou de matière première, créent des contraintes nouvelles. Celles-ci nécessitent des modifications rapides et importantes des processus

industriels, allant bien au-delà d'une adaptation au voisinage d'un point de fonctionnement antérieur. Il faut pour cela recourir aux lois physiques fondamentales, sans pouvoir s'appuyer sur l'interpolation de données précédemment mesurées, par définition inexistantes.

La même problématique se pose en géosciences, où le réchauffement climatique nécessite de prédire des comportements naturels dans un domaine de paramètres nouveaux. Ici également l'approche physique, basée sur le développement de systèmes analogues simplifiés et l'exploration de l'espace des phases pour comprendre les couplages, nous semble déterminante et indispensable pour construire les modèles pertinents en vue de simulations numériques intensives. Quelques exemples de problématiques environnementales accessibles par cette approche sont la modélisation de la fonte des glaces, la rhéologie de la banquise, la dynamique des nuages, les écoulements géophysiques (avalanches, glissements de terrain), les écoulements et mélanges dans les poreux complexes tels que les sols ou sous-sols.

Dans tous ces exemples, de natures très différentes, l'exploration systématique des comportements par une approche uniquement numérique directe, incluant « à l'aveugle » tous les processus possibles, est sans espoir, même à moyen terme, du fait de la dimension de l'espace des paramètres à explorer, de la complexité géométrique, et de fortes non-linéarités qui en découlent. La mesure de tous les champs concernés (concentration, température, position des interfaces, vitesses, tension de surface...) est également le plus souvent inaccessible. Les avancées de prédiction ou d'obtention d'effets originaux innovants nécessiteront de passer par une approche simplifiée, sur les plans numériques, expérimentaux (par l'utilisation de systèmes analogues à l'échelle du laboratoire) et également théoriques (par l'établissement de lois d'échelle basées sur les couplages dominants).

LES COUPLAGES MULTIPHYSIQUES AUX PETITES ÉCHELLES

L'exploration des couplages multiphysiques, et leur exploitation, sont prometteuses également à l'échelle de la dizaine de nanomètres. L'étude du transport à cette échelle se développe en lien direct avec les progrès récents de la compréhension des interfaces détaillés dans le premier paragraphe. En particulier, l'établissement en cours des lois fondamentales gouvernant le coefficient de glissement aux interfaces solide/liquide et leur comportement électrique ouvre de nouvelles perspectives pour le contrôle et l'exploration des écoulements phorétiques. Outre les champs scalaires précédemment cités, les charges électriques et les forces électrostatiques, à longue portée, doivent être considérées au voisinage immédiat des interfaces, ce qui élève le niveau de complexité du problème posé. Ces phénomènes de transport originaux, par essence multiphysiques, régissent les écoulements dans les microcanaux, au travers des membranes et autour des particules actives. Les mesures

directes des champs pertinents (température, charge électrique, concentration, vitesse...) sont souvent rendues particulièrement difficiles par l'extrême localisation spatiale des variations de ces champs au voisinage des surfaces solides, mais elles sont l'objet de progrès rapides. La problématique multi-échelle est également cruciale dans ce domaine, avec la nécessité, dans un objectif d'innovation, d'intégrer les éléments les plus petits dans un dispositif d'écoulement à une échelle macroscopique. La mise en série et/ou en parallèle des canaux élémentaires ouvre de nouveaux défis, et fait apparaître de nouveaux processus physiques limitants : les interactions entre canaux ralentissent par exemple le transport par des couplages diffusifs en entrée et sortie, contre lesquels il faudra lutter.

CONTRÔLER LA STRUCTURE POUR ÉLABORER DES FONCTIONS À LA DEMANDE

Nous assistons depuis quelques années au développement de nombreux projets qui visent, non seulement à une compréhension de la structure de la matière complexe, mais également à un contrôle de cette structure, en vue de « programmer » le matériau pour lui donner des fonctionnalités inédites. Ce glissement de la description physique vers la conception de matériaux est en partie motivé par des applications variées. Citons l'agroalimentaire avec des problèmes de contrôle de la rhéologie et de la texture des matériaux ; le bâtiment qui rêve de nouveaux matériaux répondant à des propriétés antagonistes de résistance, de légèreté, d'acoustique et d'isolation thermique ; la robotique en recherche de nouveaux matériaux pour des actuateurs innovants ; la santé où le développement des biomatériaux est essentielle.

Mais cet effort de « programmation » de la matière pose aussi immédiatement des questions nouvelles. Dans cette dynamique, la question de la recyclabilité des matériaux nous semble un enjeu majeur, qui demande à penser la séparation des constituants et leur réutilisation dès l'élaboration du matériau, nécessitant une plus grande compréhension des procédés de formation et de contrôle de la structure des matériaux. C'est actuellement un domaine foisonnant et particulièrement créatif, susceptible de conduire à des innovations. Dans ce cadre, des questions fondamentales se posent, notamment celle du problème inverse reliant structure et fonctions dans des systèmes fortement non linéaires, à l'interface entre des domaines variés. Nous présentons ci-dessous différents défis s'étendant du contrôle du procédé de mise en forme dans une recherche de propriétés structurelles à la recherche de matériaux aux nouvelles propriétés dynamiques.

CONTRÔLER LA RHÉOLOGIE DES FLUIDES COMPLEXES

L'étude des milieux divisés, milieux granulaires, suspensions, mousses, émulsions et gels est en pleine évolution avec un effort important dans le contrôle des interactions à l'échelle des grains/interfaces. La possibilité de jouer

avec les forces d'interaction attractives ou répulsives, de modifier la friction entre les grains ou la rugosité des particules, de modifier les propriétés d'interface par des tensioactifs ou des particules, progresse rapidement. De même, le rôle de ces propriétés locales sur les propriétés rhéologiques est de mieux en mieux compris. Cela ouvre la voie à un contrôle *a priori* des propriétés rhéologiques des fluides complexes, dans la lignée des succès obtenus sur le rhéo-épaississement. Ces développements sont rendus possibles grâce aux nouvelles techniques de caractérisation aux micro-échelles, aux nouvelles techniques de synthèse des particules et aux possibilités de fonctionnalisation des interfaces.

DE NOUVEAUX PROCÉDÉS POUR DE NOUVELLES STRUCTURES

La solidification de suspensions colloïdales, et plus largement des milieux divisés, est une approche en pleine expansion permettant de produire des milieux poreux et matériaux aux propriétés spécifiques. Les études sur les instabilités se développant lors de la solidification, les phénomènes de migration des particules, de transfert des solutés qui contrôlent la structure finale représentent un champ d'investigation dynamique qui s'ouvre à d'autres matériaux (congélation de tissus vivants, de mousses...). Le séchage est un autre procédé de création de matériaux. Peut-on structurer les matériaux complexes mous (par des cisaillements, vibrations, ultrasons...) avant séchage pour contrôler le matériau final ? C'est une question ardue mêlant compréhension de l'évolution des microstructures sous différentes sollicitations et de la dynamique de séchage dans des milieux hétérogènes.

Le concept d'auto-assemblage est une autre voie prometteuse de création de matériaux complexes identifiée depuis plusieurs années, mais n'a pas encore complètement abouti. Alors que la faisabilité est étudiée sur de petits systèmes simples, la possibilité de créer et de contrôler la structure de vrais matériaux à l'échelle macroscopique par auto-assemblage de briques microscopiques reste un vrai défi, de même que la synthèse de matériaux réellement multi-échelle, emboîtant des structures hiérarchiques. Ces matériaux architecturés sont actuellement élaborés essentiellement par fabrication additive, en essayant de minimiser le désordre microstructural. Mais un matériau architecturé naturel, le bois, présente des propriétés physiques et mécaniques inégalées et est beaucoup plus complexe et multi-échelle que ces matériaux architecturés artificiels. La possibilité de créer un bois synthétique reste pour le moment un formidable défi.

MÉTAMATÉRIAU, MATÉRIAU PROGRAMMABLE, MATÉRIAU-MACHINE

Les outils de prototypage numérique (impression 3D, micro usinage...) qui se sont démocratisés dans tous les laboratoires permettent de fabriquer des matériaux avec une méso-architecture interne contrôlée. Ils ont ainsi ou-

vert la voie à une créativité sans borne autour de matériaux programmables. Les études ont commencé sur les métamatériaux mécaniques, (origami, kirigami...), jouant sur les couplages de microstructures (plis, cavités, assemblages de structures élancées) présentant de fortes non-linéarités élastiques ou plastiques, procurant à la structure assemblée des propriétés étonnantes, qu'elles soient mécaniques ou acoustiques, et pouvant révéler des phénomènes d'hystérésis non triviaux parfois qualifiés de mémoires mécaniques.

Une évolution du domaine consiste à introduire dans les cellules élémentaires de la microstructure des éléments contrôlables par différentes méthodes d'actuation (hygro-métrique, pneumatique, champ magnétique, électrique, acoustique, lumière...), ce qui ouvre tout un domaine qualifié parfois d'impression 4D, signifiant que les structures imprimées sont programmées pour évoluer en réponse à un stimulus extérieur. Ces mouvements sans moteur d'un « matériau devenant machine » résultent d'un couplage non trivial entre les déformations induites par l'actuation et la géométrie des structures et permettent par exemple de créer des structures 3D à partir de surfaces 2D, d'obtenir des mouvements complexes d'actionneurs-surface. Ces techniques d'actuation ouvrent ainsi de nouveaux horizons en robotique, où la possibilité d'avoir des structures contrôlées en force et non en déplacement participe au développement d'une robotique souple proposant de nouvelles stratégies pour se déplacer dans des fluides complexes, manipuler des objets fragiles ou fluides, se reconfigurer, ou agir au contact du corps humain. Ces matériaux programmables se trouvent ainsi au carrefour de plusieurs communautés : sciences des matériaux, médecine (orthopédie, chirurgie), robotique. Citons aussi les collaborations avec le domaine de l'infographie dont les outils algorithmiques s'avèrent pertinents pour aborder le difficile problème inverse consistant à prédire quelle méso-architecture construire pour obtenir le mouvement ou la fonction cible.

Un vrai défi sera de dépasser les systèmes modèles souvent macroscopiques couplant quelques dizaines de motifs élémentaires et parvenir à synthétiser de vrais matériaux en descendant dans les petites échelles pour le contrôle de la microstructure. Cette perspective pose le problème des défauts qui seront inhérents à la synthèse de vrais matériaux et dont le rôle dans la réponse du système macroscopique reste ouvert.

LES SOLIDES ACTIFS

Une famille de métamatériaux en plein développement est celle des solides actifs, où les cellules élémentaires possèdent une activité propre (mouvements de rotation ou de translation). Alors que notre compréhension des fluides actifs constitués de particules actives en suspension a bien avancé, celle des solides actifs, constitués d'entités actives reliées par des interactions élastiques en est à ses balbutiements et ouvre sur des phénomènes nouveaux, par exemple des oscillations synchrones

spontanées ou des propriétés élastiques étranges (*odd elasticity*) avec des raideurs qui peuvent devenir négatives. Les applications en robotique, et de façon plus générale en conception de matériaux fonctionnels, sont potentiellement innombrables.

Ce domaine voit émerger une ingénierie des matériaux vivants très prometteuse, basée sur l'incorporation de tissus vivants au sein de milieux inertes en vue de la création de nouveaux biomatériaux et de métamatériaux actifs. Cette hybridation entre matière active artificielle et matière active vivante, vers une matière bionique, active et programmable pourrait ouvrir des possibilités insoupçonnables.

AIDER À COMPRENDRE LE VIVANT ET S'EN INSPIRER

L'interaction entre la biologie et la physique est maintenant fortement ancrée dans la communauté scientifique et plusieurs enjeux importants peuvent être identifiés. Certaines propriétés des matériaux vivants peuvent être prédites à l'aide de méthodes conceptuelles et expérimentales de la physique, en particulier celles de la physique de la matière molle, de la mécanique et de la physique statistique. La conception par les approches physiques de systèmes analogues non vivants est cruciale dans ce cadre et les allers-retours entre des expériences sur le système vivant et sur le système analogue permettent d'identifier des processus purement physiques en jeu dans les systèmes biologiques. Certaines spécificités des matériaux biologiques, actifs et hors équilibre, diffèrent fondamentalement des matériaux passifs, mais peuvent être capturées avec les outils classiques si un nouveau cadre théorique est construit pour en rendre compte.

Ce travail de compréhension du vivant se fait en parallèle avec la construction d'une matière molle « life-like », c'est-à-dire active, vivante, auto-organisée, avec de premières fonctions simples émergentes, inspirée du vivant. Ainsi, une fois identifiées, les briques élémentaires biologiques peuvent être ajoutées dans un système non vivant, on crée alors un domaine scientifique nouveau, qui transcende les motivations initiales.

Réassemblées et en interaction, ces briques de base du vivant peuvent réaliser des réseaux complexes, avec en ligne de mire du transport, des réactions, des calculs, du traitement de l'information, de l'optimisation, ainsi que des comportements oscillants, ondulatoires, auto-réparants, ou auto-duplicants — voire même reproduisant des propriétés clefs du vivant à terme.

Une ambition d'aller vers le très complexe émerge, avec pour objectifs d'élucider l'apparition et le fonctionnement de la vie et de l'intelligence, et également d'inventer de nouveaux outils pratiques en vue d'applications technologiques et sociétales d'envergure, comme le transport et le tri parallèle et optimal d'entités, le stockage et le traitement massif de l'information, ou la récupération d'énergie. Les

échelles en jeu sont celles de la protéine, de la cellule, mais également de l'organe, de la plante ou de l'animal.

Ci-dessous, à titre d'illustration, nous donnons quelques exemples parmi tant d'autres, impliquant des systèmes emblématiques de la matière molle classique, revisités avec une inspiration biologique.

TISSUS VIVANTS ET MILIEUX CONTINUS ACTIFS : VERS UNE MÉCANIQUE ACTIVE

À l'échelle macroscopique, la matière biologique peut être vue comme un milieu continu, dont on peut analyser certains comportements avec les outils de la mécanique physique, de la rhéologie et de la matière molle, qui sont de mieux en mieux mis en œuvre pour comprendre le vivant. De nombreux systèmes sont abordés avec cette approche : l'apparition des organites sans membranes est un sujet en plein essor, qui peut être abordé comme une séparation de phase liquide/liquide, la mécanique des tissus partageant des caractéristiques avec celle de milieux structurés mous, comme les mousses ou les émulsions. Récemment, la communauté a vu l'émergence très fructueuse de la physique des plantes. De nombreux phénomènes observés dans ces systèmes comme le transport de l'eau dans les feuilles, tiges ou racines, l'évolution des formes, les mouvements, la perception de stimuli externes, impliquent des effets d'évaporation, de transport, de poro-élasticité, de plasticité relevant de la physique.

Ces tissus vivants introduisent une complexité nouvelle induite par les phénomènes de croissance au sein de ces assemblées de cellules, dont la prise en compte dans les approches continues constitue un champ d'investigation important et très prometteur. Pour ces questions de croissance, une spécificité des tissus végétaux est le caractère solide des parois cellulaires, qui les différencient des tissus animaux plus plastiques, étudiés depuis plus longtemps.

De façon similaire, l'intégration d'une activité du matériau dans la modélisation de ses propriétés (ou dans la conception de nouveaux matériaux comme discuté dans le défi précédent) est une question fondamentale, très stimulante dans la communauté, et présente dans de nombreux systèmes. Les gels polymériques contenant des moteurs moléculaires et les suspensions de bactéries sont des exemples importants de solides et fluides dont l'activité est d'origine biologique, mais la problématique est similaire lorsque l'activité est de nature physico-chimique. Le défi est alors de définir et mesurer une viscosité ou une élasticité active, dans un cadre conceptuel qui continuera à évoluer fortement.

Ce champ s'enrichit actuellement des outils développés dans le domaine des écoulements de cristaux liquides. On sait faire maintenant des cristaux liquides biomimétiques. Citons par exemple l'hydre, dont les filaments d'actine s'alignent et conduisent à une phase nématique active, impliquée dans la génération de l'animal ; les co-

lonies de bactéries ou de virus peuvent également présenter un ordre orientationnel. Dès lors, tout l'arsenal classique en théorie des cristaux liquides peut être mis à profit de façon puissante. Ces matériaux actifs nourrissent en retour la physique des cristaux liquides. Toute une nouvelle palette d'éléments actifs est à la disposition des scientifiques : les objets autopropulsés créent des défauts topologiques, les microtubules et des moteurs moléculaires créent des faisceaux autoassemblés actifs... En couplant ces ingrédients biologiques aux ingrédients physico-chimiques, par exemple les forces de déplétion induites par les polymères, on obtient des propriétés fascinantes (turbulence, courants spontanés, ordre émergent). Toute une classe nouvelle de phénomènes non linéaires est à explorer et ouvre des perspectives importantes, tant au plan théorique qu'au plan des innovations. Un des enjeux identifiés est de faire des systèmes capables de s'autorégénérer, en jouant sur l'auto-organisation, les défauts, et la chimie.

LA COMPLEXITÉ BIOLOGIQUE À L'ÉCHELLE MOLECULAIRE

À une échelle plus locale, l'adhésion des entités biologiques et le transport biologique sélectif sont de mieux en mieux caractérisés d'un point de vue biologique et moléculaire, et conduisent de ce fait à des questions complexes, mais bien posées d'un point de vue de la physique. Les interactions impliquées sont d'origines multiples : entropiques, osmotiques, ioniques, dipolaires, hydrodynamiques, élasto-hydrodynamiques... La combinaison d'interactions multiples, d'origine enthalpique ou entropique, conduit à des comportements non-linéaires. Des exemples emblématiques sont la non-linéarité de l'adhésion avec la densité de ligands, ou transport sélectif à travers les pores nucléaires, remplis de macromolécules, (les « pores poilus »).

Au-delà de la complexité physico-chimique des processus, une question importante est le rôle de l'activité, par exemple cytosquelettique, ou de forces extérieures (avec des exemples de renforcement de l'adhésion sous tension à l'échelle de la liaison moléculaire). La clé sera donc de combiner la mécanique des surfaces molles/complexes, l'activité, les polymères et les interactions multivalentes. Une stratégie prometteuse pour aborder ces questions serait donc de concevoir des expériences modèles microfluidiques dans une approche physicienne, mais avec les surfaces adaptées, biofonctionnalisées avec les molécules d'intérêt biologique. Les outils de la physique (AFM, spectroscopie de force, etc) et l'expertise forte en physique des systèmes chargés, des polymères et des interactions DLVO seront cruciaux pour aborder ces questions.

EFFETS MÉMOIRE : VERS DES NEURONES ARTIFICIELS ?

Une autre question émergente, associée au transport des ions, est la possibilité de mémoires, de capacités de calcul

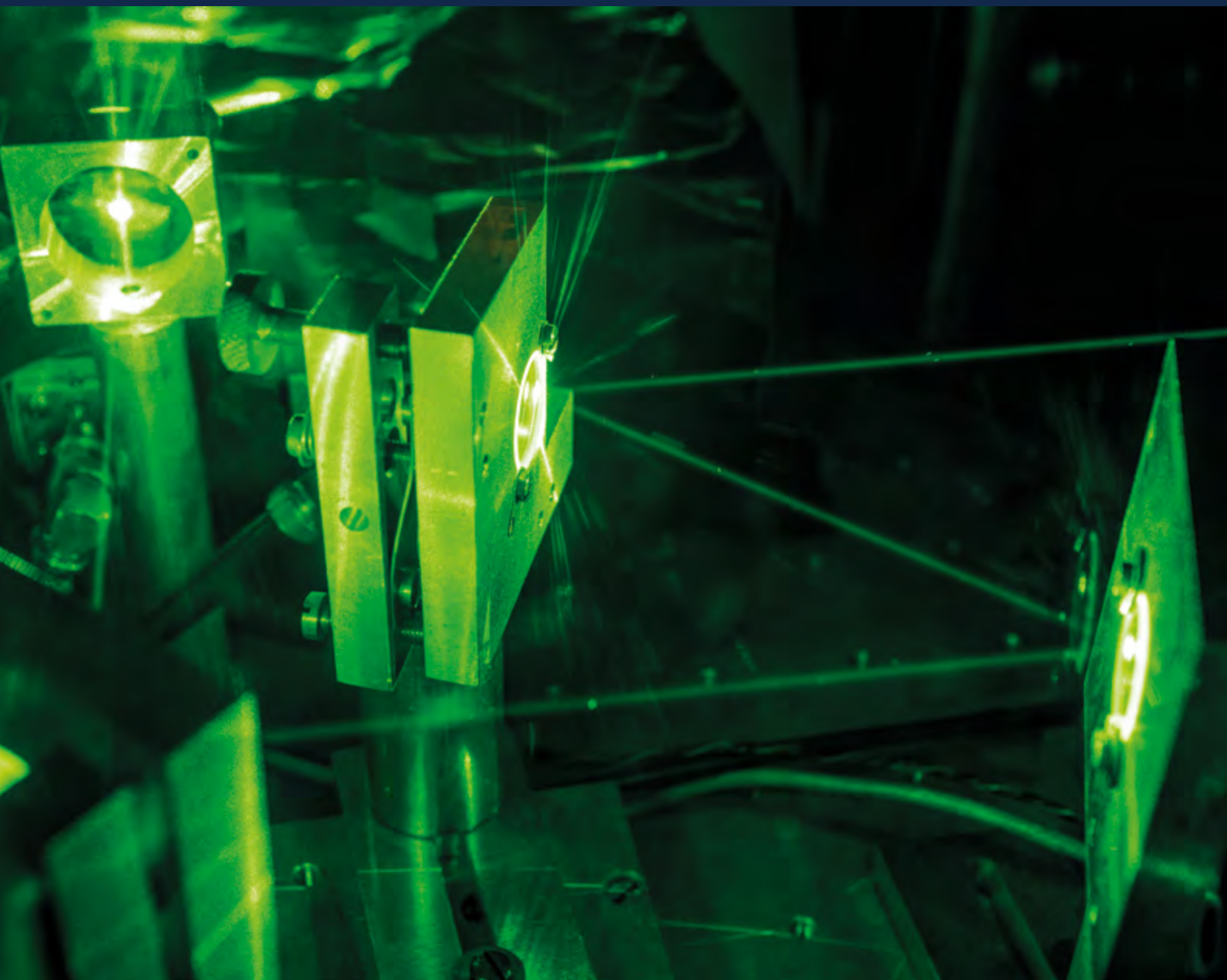
ou de neurones physiques. Cet essor est porté au moins par deux grands axes de développement. Le premier propose d'exploiter le transport ionique confiné, pour trouver des systèmes où la réponse du système ionique possède un retard, ou une durée caractéristique qui lui permet d'intégrer de la mémoire, créant ainsi l'équivalent ionique du memristor. Le second axe propose d'exploiter les fluctuations dans des milieux complexes. En effet, la complexité, apportée par le confinement, ou alors par l'ajout d'écoulement, d'un environnement polymérique ou de sites d'adhésion par exemple rend les fluctuations non-gaussiennes et possiblement non-markoviennes, c'est-à-dire avec de la mémoire. Aujourd'hui, les dispositifs expérimentaux commencent à avoir accès à des échelles de temps suffisamment petites pour sonder ces effets mémoire, ce qui ouvre un champ d'investigation prometteur.

Cette capacité à intégrer des effets mémoire fait écho à une tendance plus globale de la physique des systèmes complexes à étudier et mimer certaines spécificités de la matière vivante. On retrouve également cette problématique dans les directions émergentes de la matière active avec l'idée d'une matière active «cognitive», «informationnelle» dont les briques élémentaires seraient capables de recueillir de l'information, rétroagir spontanément à partir de celle-ci, mémoriser/évoluer en fonction de leur histoire passée. On retrouve dans cette direction une forte interface avec la chimie et la biologie, avec en particulier des stratégies expérimentales autour de systèmes chimériques ou hybrides qui détournent des objets biologiques et leur fonction pour l'élaboration de nouveaux systèmes artificiels.

CONCLUSIONS

La physique de la matière complexe est un domaine extrêmement vivant et créatif, s'ouvrant vers de nouveaux objets et des champs disciplinaires de plus en plus variés. L'augmentation massive de nos capacités de mesure et de simulations numériques, qui s'accélère avec l'arrivée de l'IA, est la source de données nouvelles, de plus en plus nombreuses, riches et complexes. Appréhender cette complexité, dépasser la description pour parvenir à la compréhension est au cœur de la physique de la matière complexe. Dans un monde en pleine transition, la capacité des physiciennes et physiciens à appréhender la complexité, en la réduisant à ses caractéristiques les plus pertinentes, en la confrontant aux lois fondamentales qui régissent le réel et dont il faut entretenir l'expertise, est plus précieuse que jamais.





Expérience de spectroscopie à haute résolution de l'atome d'hydrogène.
© Hubert RAGUET/LKB/CNRS Images

Matière, lumière et processus quantiques

RÉSUMÉ

Les matériaux quantiques sont caractérisés par des phénomènes collectifs électroniques. Les progrès récents selon plusieurs axes fondamentaux de leur étude ouvrent une nouvelle ère qui sera particulièrement prolifique. Le premier axe est la **production de matériaux de qualité**. L'exploration indispensable de nouvelles familles de matériaux s'accélérera via l'utilisation de techniques numériques notamment d'apprentissage statistique. Cette exploration sera complétée par la croissance améliorée de matériaux artificiels, des hétérostructures en feuillets dits de van der Waals, à l'épitaxie couche par couche. Du côté de la théorie, **approches numériques réalistes et résolutions de modèles simplifiés** se rejoindront et permettront une prédiction quantitative des propriétés de matériaux quantiques. En parallèle, le spectre d'états accessibles s'élargira grâce aux nouvelles capacités de contrôle des matériaux. Par exemple un couplage fort voire sélectif à une cavité optique permettra de réaliser des états exotiques hors d'équilibre. De telles techniques issues du développement de circuits quantiques s'adapteront au champ des matériaux quantiques. Ces progrès s'accompagneront du développement de **nouvelles techniques expérimentales** en particulier à hautes résolutions spatiales et temporelles. Une complexité croissante de la caractérisation des états de la matière se dessine et, au vu de l'éventail quasi infini de matériaux disponibles, naturels ou artificiels, de nouveaux états exotiques seront très certainement mis à jour. De nouveaux progrès sont escomptés dans la compréhension des phases supraconductrices, magnétiques, et des phases ordonnées topologiquement. Ces dernières incluent les liquides de spins ou les supraconducteurs topologiques, et sont caractérisées par des excitations exotiques telles que les états de Majorana ou des quasi-particules non-abéliennes. Le caractère exotique de ces excitations requiert de **nouvelles stratégies d'observation**. L'utilisation de circuits cohérents de phase pour caractériser et manipuler ces excitations s'amplifiera. De même, l'étude du transport quantique de la chaleur et de la thermodynamique des systèmes quantiques est en plein essor. En parallèle, les circuits hybrides comportant des résonateurs supraconducteurs devraient permettre un couplage fort à des objets quantiques individuels. D'autres systèmes hybrides mésoscopiques tels que les systèmes optomécaniques opèrent aujourd'hui dans le régime quantique, l'interaction optomécanique permettant à la fois de préparer des états non classiques du champ électromagnétique, et de refroidir un mode mécanique jusqu'à son état fondamental.

Par ailleurs, les 30 dernières années ont vu une transformation spectaculaire de la physique atomique, moléculaire et optique, grâce à des percées expérimentales dans le contrôle de la matière par la lumière, et de la lumière elle-même. Depuis le refroidissement et le piégeage d'atomes par laser, le contrôle quantique atteint aujourd'hui permet de disposer d'ions, d'atomes et de molécules ultra-froids, susceptibles d'être interrogés et contrôlés avec précision. Cette discipline a atteint une situation enviable où les protocoles historiquement démontrés avec des atomes alcalins, très sensibles à l'excitation par laser, sont désormais adaptés avec succès à des espèces atomiques et moléculaires de plus en plus variées. La maturité dans la compréhension des phénomènes fondamentaux à l'œuvre, dans le rôle primordial de la structure électronique des atomes et molécules, et dans les sources laser disponibles permet d'envisager l'avenir de cette thématique sur des champs encore plus vastes, au-delà de la seule communauté de la physique atomique et moléculaire. À travers les enjeux autour des mesures de précision et de nouvelles formes de spectroscopie, ce sont toutes les potentialités de cette discipline que nous avons souhaité mettre en avant. La simulation quantique, qui reproduit à l'aide de systèmes expérimentaux contrôlés des hamiltoniens modèles, joue un rôle remarquable de ce point de vue. Initialement réalisée avec des gaz d'atomes froids, elle s'étend à des systèmes de matière condensée, des condensats d'excitons-polaritons aux moirés dans les hétérostructures twistées. Tirant parti de la variété des atomes et molécules diatomiques pour simplifier les protocoles, elle permettra de passer du simulateur au solveur quantique, afin d'aborder des hamiltoniens plus complexes, incluant notamment le couplage entre topologie, interactions et désordre. Alors que la simulation quantique s'inspire traditionnellement de problèmes de matière condensée, elle vise désormais d'autres domaines de la physique, de la physique des hautes énergies à la gravité analogue.

Matière, lumière et processus quantiques

ATOMES, IONS ET MOLÉCULES : SUPPORTS POUR LES MESURES DE PRÉCISION

Les expériences impliquant des atomes ou molécules et leurs interactions avec des champs électromagnétiques permettent déjà d'atteindre des **précisions de mesure** qui les rendent compétitives avec les expériences de hautes énergies en ce qui concerne les tests des lois fondamentales de la physique. Ces mesures reposent principalement sur l'estimation des forces d'inertie par transfert cohérent d'impulsions ou la comparaison de fréquences de champs électromagnétiques asservies sur des horloges atomiques. Ces dernières permettent de mesurer des fréquences optiques avec une stabilité de l'ordre de quelques 10^{-18} . La stabilité en fréquence de telles ondes est attendue dans les 5 années qui viennent sous le seuil de 10^{-20} alors que la meilleure exactitude est anticipée à quelques 10^{-19} . Ces exactitudes extrêmes nécessitent de répondre à de nouveaux défis, particulièrement exigeants pour les horloges distantes, car elles impliquent de connaître la différence de position dans le potentiel gravitationnel terrestre avec une précision inférieure au millimètre. Des **systèmes quantiques hybrides** vont se développer pour contourner cette limitation avec comme fil conducteur la comparaison de références situées au même point, que ce soit des transitions différentes au sein du même système quantique ou de systèmes hébergés par le même piège, comme des nuages d'atomes froids alignés au sein d'un réseau optique ou des ions piégés au sein d'un même cristal de Coulomb.

Concevoir des systèmes quantiques hybrides permettra aussi d'assigner les tâches de caractérisation de l'environnement aux différents sous-systèmes, et d'exploiter ainsi la maîtrise acquise ces dernières années sur les systèmes individuels. L'hybridation peut aussi être envisagée avec un environnement électromagnétique contrôlé exploitant les interactions avec l'environnement, par exemple grâce à une surface structurée. Cela pourra permettre de protéger le système de sources de décohérence comme les collisions ou l'émission spontanée, avec un impact important, par exemple sur l'utilisation possible de molécules froides. Dans cet objectif, la **simplification des protocoles** éprouvés pour piéger et refroidir les systèmes simples semble une voie incontournable des prochaines années pour envisager d'étendre ces méthodes aux atomes polyvalents, aux molécules, même polyatomiques, et autres édifices quantiques non conventionnels comme les ions très chargés ou radioactifs, voire à des systèmes possédant un plus grand nombre de degrés de liberté comme

des cristaux d'ions piégés ou des nanostructures. Cette simplification sera aussi nécessaire à la démocratisation et au partage de ces méthodes au sein d'**équipes pluridisciplinaires** qui seront sûrement plus à même d'exploiter pleinement ces systèmes hybrides.

La majorité des protocoles utilisés pour étudier la physique fondamentale, que ce soit dans des dispositifs de type horloges ou des interféromètres à ondes atomiques, ont jusqu'à présent utilisé la **superposition cohérente** d'états plutôt que l'intrication. Cette dernière stratégie est désormais envisagée comme une tendance majeure pour les années à venir. L'augmentation du **temps de cohérence** de ces états quantiques au-delà de plusieurs secondes sera certainement un enjeu essentiel dans les prochaines années. Celle-ci passe par l'exploitation de corrélations quantiques encore à mettre en œuvre, mais aussi par la poursuite des efforts permanents pour réduire les bruits de l'environnement et améliorer la cohérence des sources laser. Dans ce registre, un profond changement de paradigme est à prévoir pour dépasser les limites techniques rencontrées dans la cohérence de l'interaction laser-atome.

Les contextes expérimentaux où l'**intrication** est déjà utile aux mesures de précision sont encore rares. Ils concernent surtout les ions piégés où les techniques développées pour le calcul quantique sont exploitées pour attribuer à deux ions différents les tâches de référence de fréquence et d'échange avec l'environnement, nécessaires pour le refroidissement laser ou la lecture de l'état interne, dans l'esprit d'hybridation mentionné plus haut. Ce type d'expériences, encore inexistantes en France, est amené à se développer, car un gain en précision de plusieurs ordres de grandeur est attendu par l'utilisation d'espèces moins conventionnelles telles que les ions fortement chargés ou des atomes et molécules radioactifs. Même si dans un certain nombre de cas, l'intrication, ou plus généralement la création d'états collectifs fortement corrélés tels que les états compressés (*squeezing*), contribuera à améliorer la précision des mesures et à les protéger de certains types d'effets systématiques, elle sera aussi une source de fragilité et de plus grande sensibilité à des effets parasites. Hormis les mesures emblématiques réalisées par les observatoires d'ondes gravitationnelles à interféromètre laser (LIGO-VIRGO), la compression n'est encore que peu utile dans un contexte métrologique. Sa mise en pratique au sein de dispositifs tels que des horloges atomiques ou des interféromètres est aussi un axe de recherche majeur en perspective. Par ailleurs,

l'augmentation du nombre de systèmes quantiques participant à la mesure (taille des nuages d'atomes, flux de jets atomiques) pour gagner en précision est une voie privilégiée pour les années futures. D'autres voies de gain méritent encore d'être explorées comme le transfert de grand nombre de quanta d'impulsion ou la corrélation des systèmes uniques.

De façon générale, la quête d'une plus grande précision en exploitant la nature quantique des états laisse entrevoir pour les années futures le développement de nouveaux types de protocoles expérimentaux et de sources laser toujours plus performantes. Pour démocratiser les techniques de contrôle développées dans un contexte de mesure de précision, la communauté française dispose d'un outil précieux qui dispense d'opérer une référence de fréquence, le réseau **REFIMEVE**. Cet outil, qui possède aujourd'hui le statut d'infrastructure de recherche et qui permet de disséminer une référence de fréquence optique par lien optique fibré, est essentiel à l'évolution des protocoles vers une reproductibilité, stabilité et exactitude accrues. Ce réseau permet des mesures absolues de fréquence avec une instabilité relative de 10^{-15} après une seconde d'acquisition et une incertitude relative ultime de 2.10^{-17} . L'objectif pour les 5 prochaines années est de gagner un ordre de grandeur sur ces performances. Ce réseau permet aussi la comparaison de fréquence entre horloges distantes à mieux que 10^{-19} , ce qui est un atout pour leur développement. Cet outil de démocratisation des mesures de précision aura un impact par exemple pour les bases de données moléculaires astrophysiques ou atmosphériques ou la mise au point de modèles plus précis pour traiter des molécules modèles.

MATÉRIAUX QUANTIQUES ET PHASES ÉMERGENTES

L'étude des phases exotiques de la matière quantique repose sur la production de matériaux de haute qualité. De fortes corrélations électroniques impliquent une largeur de bande — énergie cinétique typique dans un cristal — étroite par rapport à l'intensité des interactions. Plusieurs recettes sont possibles, telles que des composés comportant des électrons des couches 3d ou 4f, des composés moléculaires, le remodelage de bandes dans les super-réseaux de moiré, les effets de fort couplage spin-orbite, les interférences destructives dans des réseaux complexes tel que le réseau de Kagomé. Au-delà des fortes interactions, de nouveaux ingrédients tels qu'un fort couplage spin-orbite, à l'origine de structures de bandes topologiques, ou la présence de textures de spin et orbitale, augmentent la richesse des nouveaux états émergents possibles. Au vu de l'éventail quasi infini de matériaux disponibles, naturels ou artificiels, il est certain que de nouveaux états exotiques de la matière seront mis à jour dans les années à venir.

SUPRACONDUCTIVITÉ

L'étude de la supraconductivité et le défi posé par la com-

préhension des supraconducteurs à haute température critique ont été profondément renouvelés par la découverte de nouveaux matériaux, tels que les supraconducteurs à base de fer ou les hétérostructures de van der Waals à base de graphène ou de dichalcogénures de métaux de transition. La fabrication de bicouches de graphène dites «twistées», c'est-à-dire dont l'angle de rotation relatif peut être ajusté, a conduit à la préparation de systèmes de moirés possédant des propriétés électroniques remarquables. En parallèle, la course à la température critique élevée continue, visant à s'approcher de la température ambiante en particulier pour les matériaux sous très forte pression et comportant un fort couplage électron-phonon lié à l'hydrogène métallique.

L'avenir dans ce domaine repose sur une caractérisation améliorée d'états de la matière de plus en plus complexes, notamment via la **présence de plusieurs types d'ordres** coexistant avec la supraconductivité tels que le magnétisme ou les ordres de charge. Ainsi, les cuprates sont caractérisés par une compétition entre supraconductivité et ordre magnétique; dans les pnictures, la nématicité, qui décrit une hétérogénéité particulière de la densité, amplifie la température critique de supraconductivité. Citons également la recherche d'états de courants de boucle, nouvelle forme de magnétisme cristallin, coexistant potentiellement avec de la supraconductivité. Ainsi dans de nombreux cas, la détermination du seul type de supraconductivité, en particulier de la symétrie associée, s'avère insuffisante pour comprendre son origine. Remarquons que la juxtaposition de ces différents ordres requiert de nouvelles sondes expérimentales discutées plus loin. Du côté théorique, les études récentes, en particulier numériques, de modèles simplifiés tels que le modèle de Hubbard semblent converger vers une compréhension de leur complexe diagramme des phases. Cette compréhension sera le point de départ de **descriptions quantitatives de matériaux réalistes**, dans le cadre conceptuel d'études de ces matériaux quantiques à fortes corrélations proposé notamment par le champ moyen dynamique.

MAGNÉTISME ET ORDRES FERROÏQUES

Ces dernières années ont vu un développement important de nouveaux matériaux magnétiques, notamment les matériaux magnétiques bidimensionnels tels que CrI_3 , Fe_3GeTe_2 et ses dérivés, dont les propriétés sont très sensibles aux stimuli externes. En spintronique, l'intérêt s'est porté sur les systèmes antiferromagnétiques, leurs propriétés de transport de spin et leur dynamique. Récemment a également émergé le concept d'ordre alterné magnétique correspondant à une situation intermédiaire entre ferromagnétisme et antiferromagnétisme. Dans les paragraphes suivants, nous passons en revue les avancées et perspectives dans plusieurs systèmes d'intérêts magnétiques et ferroïques au sens large.

Les **skyrmions** magnétiques sont des arrangements de spins non-coplanaires chiraux possédant une charge

topologique, résultant de la compétition entre l'énergie d'échange, l'anisotropie et l'interaction de Dzyaloshinskii-Moriya issue du couplage spin-orbite. Les skyrmions apparaissent soit dans des matériaux non-centrosymétriques tels que MnSi, soit dans des multicouches magnétiques intégrant des matériaux magnétiques et des métaux lourds. Les skyrmions peuvent avoir des tailles de quelques nanomètres seulement et ainsi être vus comme des bits magnétiques ultimes pour le stockage d'information. Ils sont manipulables par champ électrique ou par des courants de spin et se déplacent à des vitesses de l'ordre du km par seconde. Les travaux les plus récents explorent leur réalisation en trois dimensions, ce qui offre des degrés de libertés additionnels pour stabiliser des textures topologiques plus riches (cocons, *bobbers*, globules, hopfions, etc.). Les recherches futures viseront à mieux maîtriser leur génération par divers stimuli, leur dynamique dans la gamme hyperfréquence, leurs propriétés de transport (effet Hall topologique) et leur couplage avec d'autres ordres, ferroïques, topologiques, etc.

Dans certains systèmes magnétiques, la géométrie du réseau magnétique rend impossible la minimisation des énergies d'échange : **l'ordre magnétique est frustré**. Les pyrochlores de terre rare $A_2B_2O_7$, où A est une terre rare et B un élément de transition, jouent un rôle capital dans l'étude de phases exotiques magnétiques telles que la glace de spin ou les phases de moments fragmentées. La compréhension de nouvelles familles, à base notamment de cérium ou de praséodyme, et la modélisation des différents couplages permettant de comprendre leurs propriétés magnétiques s'annoncent comme un axe complémentaire très prometteur.

Les recherches récentes sur les **matériaux ferroélectriques** ont d'une part considérablement élargi l'éventail des composés disponibles, notamment dans les composés de van der Waals ou dans des phases à structure wurtzite, et d'autre part mis à jour des objets nouveaux de très petite dimension, tels que des vortex et skyrmions dipolaires. Leur rôle dans l'obtention d'une constante diélectrique négative, permettant de réaliser des transistors moins énergivores, apparaît comme une direction à explorer plus avant.

Les **matériaux multiferroïques** possèdent plusieurs ordres ferroïques généralement couplés entre eux et sont typiquement ferroélectriques et (anti)ferromagnétiques. Alors que les multiferroïques étaient initialement considérés comme très rares, deux décennies de recherche ont identifié de nombreux mécanismes par lesquels un caractère de ferroélectricité émerge dans un système magnétique en présence de certains ordres de spins non colinéaires. Le couplage magnétoélectrique entre ordres permet de modifier les propriétés magnétiques via un champ électrique, ce qui offre des possibilités intéressantes pour des dispositifs de logique à mémoire non volatile. Le seul multiferroïque à température ambiante est BiFeO₃, son ordre de spin étant une cycloïde de 60

nm de période. Des travaux récents ont montré que ses configurations statiques et ses excitations de spin pouvaient être manipulées électriquement. Les enjeux pour l'avenir dans ce domaine concernent la découverte d'autres multiferroïques à température ambiante et de systèmes possédant des couplages magnétoélectriques plus forts, l'étude de leur dynamique à haute fréquence (électromagnons), et l'exploration des propriétés topologiques des ordres de spin et de dipôles électriques à faible dimension.

MATÉRIAUX À COUPLAGE SPIN-ORBITE OU STRUCTURE DE BANDE TOPOLOGIQUE

Un fort couplage spin-orbite de type Rashba apparaît aux surfaces ou interfaces d'éléments lourds ou dans des gaz bidimensionnels (III-V basés sur InAs par exemple, ou oxydes basés sur SrTiO₃ ou KTaO₃). Dans ces systèmes, la direction de spin est typiquement transverse à la direction de l'impulsion. Cela permet ainsi de générer un courant de spin à partir d'un courant de charge ou, réciproquement, de détecter un courant de spin en le convertissant en courant de charge. L'utilisation de tels matériaux permettrait d'éviter l'utilisation d'éléments ferromagnétiques en spintronique et de s'affranchir ainsi de plusieurs de leurs inconvénients associés à l'énergie nécessaire pour renverser leur aimantation ou au champ magnétique rayonné par ces éléments qui perturbe les éléments voisins dans des architectures de mémoires. Les courants de spin générés grâce au couplage spin-orbite donnent naissance à des couples agissant sur une aimantation de façon très efficace et ouvrent la voie à une nouvelle génération de mémoires magnétiques. Beaucoup reste à faire pour comprendre en détail la physique de l'interconversion spin-charge et pour identifier les meilleurs systèmes en termes d'efficacité de conversion. Un nouveau champ de recherche, **l'orbitronique**, vise à exploiter non plus les courants de spin, mais les courants de moment orbital. Outre de nombreuses questions fondamentales concernant la génération, la propagation et la détection de ces courants, les premiers résultats suggèrent de forts effets dans des éléments légers et abondants tels que le titane ou le chrome, ce qui présente d'indéniables avantages environnementaux pour des applications futures.

Initialement découvertes dans les matériaux à fort couplage spin-orbite tels que les puits quantiques de HgTe/CdTe ou les composés à base de bismuth, les propriétés topologiques des structures de bandes se retrouvent désormais dans de nombreux matériaux. Leur manifestation principale est l'existence d'états métalliques de surface, de bord ou de coin, sondés par des techniques de photoémission ou de transport. La notion d'isolants topologiques d'ordres supérieurs a permis de décrire les comportements de matériaux réalistes tels que le bismuth, au-delà du cadre idéal de la théorie. Les prochaines années permettront une meilleure caractérisation de ces phases topologiques et de la recherche de matériaux optimaux. Un axe fort de développement est

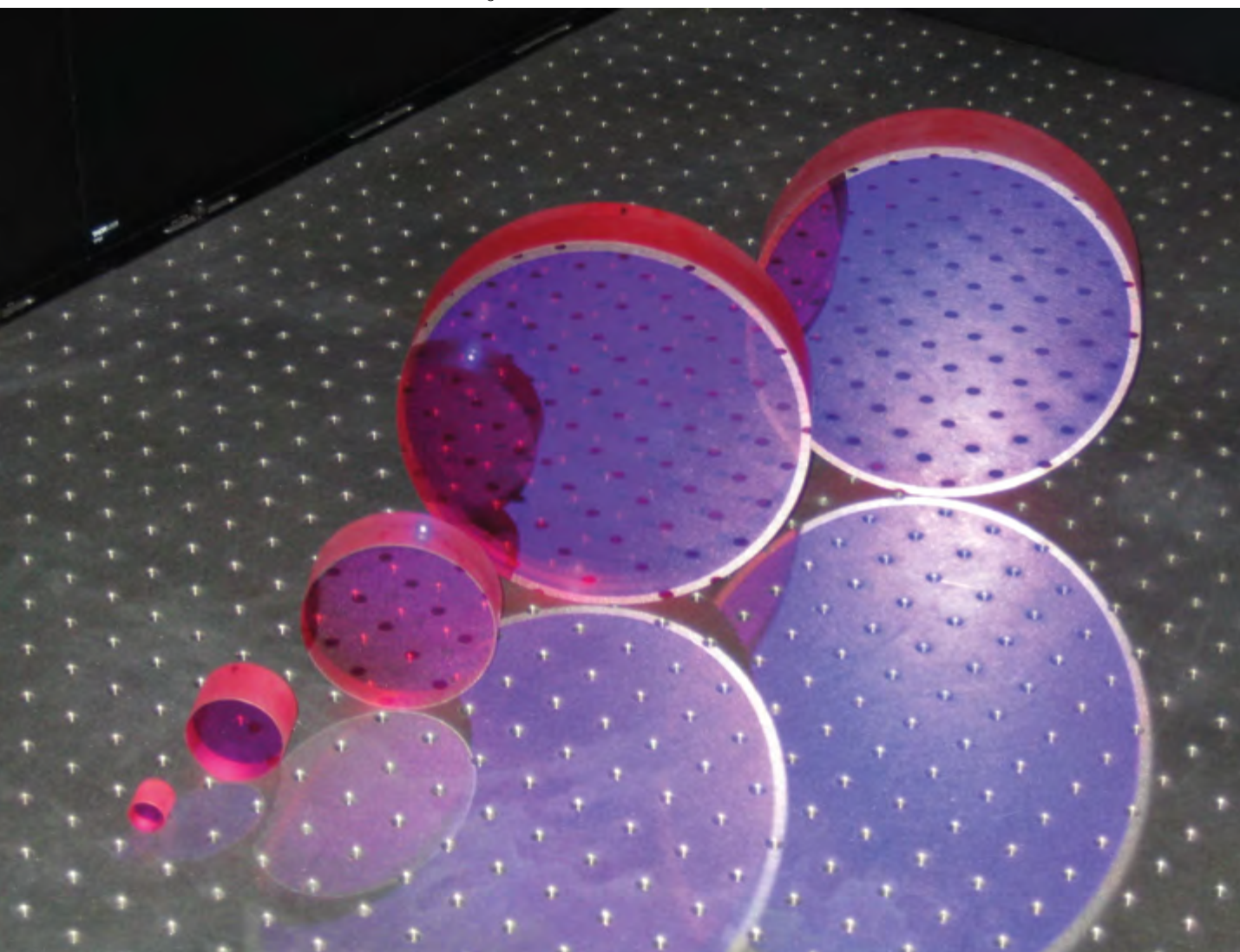
basé sur la synthèse de matériaux et **hétérostructures**, de van der Waals ou par croissance en épitaxie, combinant des **propriétés topologiques** à d'autres ordres, par exemple **magnétiques**, pour donner naissance à de nouvelles phases. Un exemple récent est la démonstration d'un effet Hall quantique intrinsèque sans champ magnétique, stable jusqu'à des températures de 7 K. Les perspectives majeures dans ce domaine correspondent à la recherche de matériaux dans lesquels interactions et propriétés topologiques des bandes seraient présentes conjointement.

Une évolution à plus long terme de ce domaine consiste à tirer parti des progrès considérables dans le domaine des matériaux topologiques pour les appliquer à d'autres types de degrés de liberté. Citons par exemple les bandes de magnons dans les composés magnétiques et la perspective de développement d'une **magnonique topologique**. Un tel développement passera par l'étude des conséquences de l'existence de phases de Berry sur le transport de la chaleur et du spin et la recherche d'analogues des isolants topologiques et des semi-métaux.

ORDRE TOPOLOGIQUE

Les phases ordonnées topologiquement ne sont pas caractérisées par une brisure de symétrie et échappent donc au paradigme de Landau. Elles sont distinctes des matériaux à structure de bande topologique en étant intriquées quantiquement à longue portée. De plus, leurs excitations élémentaires sont caractérisées par une fractionalisation de leurs nombres quantiques, ce qui ouvre des perspectives fascinantes en particulier dans les cas où leur statistique est non abélienne, c'est-à-dire que les opérations d'échange entre excitations ne commutent pas entre elles. Parmi ces perspectives, de nombreuses pistes ont été proposées pour réaliser des opérations de calcul quantique à l'aide de telles excitations contrôlées. Cet ordre topologique tire son origine de la découverte et la caractérisation de l'effet Hall quantique fractionnaire. Depuis, d'autres phases ont été proposées dont les **phases de Kitaev** et les phases de **supraconductivité topologique**. Au-delà de l'exploration de nouveaux matériaux prometteurs, leur étude passe également par l'utilisation de simulateurs quantiques discutés plus bas.

Cristaux TiSa. © Gilles CHERIAUX/LULI/CNRS Images



Les aspects topologiques de la supraconductivité nécessitent une supraconductivité exotique. La signature attendue de cette supraconductivité topologique est l'existence d'états de bords, analogues de **fermions de Majorana**, c'est-à-dire qu'ils sont leurs propres antiparticules. Initialement, les propriétés de dispositifs à nanofils hybrides supraconducteur/semi-conducteur furent interprétées comme signatures de telles excitations. Le sujet est désormais fortement débattu et la recherche de ces états de bords connaît actuellement un fort renouveau. À faible dimensionnalité, les corrélations électroniques et les propriétés topologiques donnent naissance à une extraordinaire variété de propriétés physiques dont seule une fraction a été explorée à ce jour. Deux familles de systèmes ont particulièrement retenu l'attention de la communauté, les interfaces et hétérostructures d'oxydes et les hétérostructures de van der Waals. La découverte d'états supraconducteurs avec fort couplage Rashba (deux propriétés ajustables électriquement) dans des interfaces d'oxydes SrTiO_3 ou KTaO_3 ouvre des perspectives nouvelles. Une autre possibilité de réalisation de cette supraconductivité topologique repose sur des hétérostructures de van der Waals possédant un fort couplage spin-orbite et une aimantation intrinsèque. Une voie alternative pour réaliser ces états de Majorana consiste à sonder la nature topologique d'états terminaux de chaînes d'atomes magnétiques déposés à la surface d'un supraconducteur. Il convient de remarquer que la détection non ambiguë de ces états de bords topologiques requiert de nouvelles sondes adaptées à leur nature exotique.

La recherche de nouveaux états topologiques, appelés **liquides de spins**, est également un axe fort de l'étude des matériaux magnétiques frustrés. Une telle phase a été découverte dans les herbertsmithites, matériaux de type **réseau de Kagomé**. De nombreuses questions demeurent ouvertes, notamment sur la nature des excitations fractionnaires et les méthodes permettant de les sonder. Plusieurs matériaux ont été proposés, mais requièrent l'amélioration de leur modélisation au-delà du système idéal et de la compréhension des propriétés associées. Les perspectives comprennent une modélisation des défauts des matériaux permettant éventuellement de modifier les propriétés et de sonder ces nouvelles phases. Des réflexions plus approfondies sur d'autres matériaux tels que les vanadates, sur les effets de dopage dans ces liquides de spins, ou encore la possibilité de réaliser ces phases à l'aide d'aimants moléculaires sont en cours. L'élaboration de couches minces de tels matériaux permettrait l'utilisation de techniques de champ proche ou de techniques thermodynamiques pour la caractérisation de ces liquides de spins. Un second type de liquide de spin d'intérêt est celui des **matériaux de Kitaev**. L'existence de ces phases a été explorée dans plusieurs classes de matériaux : RuCl_3 , les iridates et les cobaltates. Cependant, la communauté est toujours à la recherche d'un système modèle. Les perspectives incluent la compréhension des effets de champ magnétique sur les phases candidates et une détection non ambiguë de leurs états de bord. L'utilisation de sondes en champ

proche sur des hétérostructures ou couches minces est ici encore une perspective attrayante. Mentionnons également que la modélisation quantitative de ces phases de liquides de spins pose des défis théoriques formidables et requiert le développement et l'utilisation de méthodes aussi bien analytiques que numériques poussées telles que celles de réseau tensoriels ou neuronaux. Les progrès récents ont été essentiellement algorithmiques et ont visé à décrire les excitations de ces phases au-delà de l'état fondamental et leurs manifestations observables. Du côté théorique, la notion de symétries généralisées semble un concept prometteur dont l'exploration mérite d'être poursuivie.

DÉFIS EXPÉRIMENTAUX POUR LA SYNTHÈSE ET L'INTÉGRATION

La synthèse et l'intégration des matériaux quantiques dans des dispositifs posent de multiples défis. Alors que traditionnellement les matériaux peuvent être étudiés soit sous forme massive soit sous forme de couches minces, la découverte du graphène et l'essor des matériaux de van der Waals ont introduit une nouvelle méthode de fabrication par exfoliation de monocristaux. Il faut souligner le rôle essentiel des chimistes du solide dans ce domaine, et la capacité qu'ont eue physicien·nes, chimistes et ingénieur·es de travailler de concert pour faire avancer le sujet de façon spectaculaire. Cette méthode reste la plus employée à ce jour, notamment car elle est relativement facile à mettre en œuvre et permet d'étudier des flocons d'un très grand nombre de systèmes. Cependant, pour mener des études systématiques et dans l'objectif de fabriquer des dispositifs à partir des matériaux quantiques puis de les intégrer dans des architectures, il est indispensable de synthétiser des couches de plus grande surface (plusieurs cm^2 et à terme sur wafer de 200 voire 300 mm). Un large effort vise à élaborer des couches minces de ces matériaux par épitaxie. Il est essentiel d'élargir la classe de matériaux ainsi réalisables afin de créer des hétérostructures combinant plusieurs composés, essentiels pour les applications futures.

Concernant les oxydes fonctionnels, l'épitaxie d'un grand nombre de composés est désormais bien maîtrisée. La qualité des échantillons est au niveau des meilleures hétérostructures de semi-conducteurs, avec l'avantage d'une variété de propriétés bien plus grande, permettant de coupler entre eux des matériaux très différents et d'obtenir des fonctionnalités nouvelles. Des méthodes innovantes sont apparues récemment, permettant à partir d'un film épitaxié dans une phase de stabiliser via un traitement thermique et/ou chimique une autre phase, souvent très difficile, voire impossible à synthétiser directement. C'est le cas par exemple des nickelates *infinite-layer* supraconductrices synthétisées à partir d'une couche mince à structure pérovskite via une réduction topotactique. Enfin, il est désormais possible d'isoler une couche mince, voire une hétérostructure, de son substrat via la dissolution post-croissance d'une couche sacrificielle. Il est ainsi possible d'obtenir des membranes ul-

tramances d'oxydes fonctionnels qui peuvent être reportées sur d'autres substrats, combinées entre elles avec un angle contrôlable (à l'instar des approches utilisées dans les matériaux de van der Waals), ou combinées avec d'autres matériaux. Nul doute qu'à l'avenir cette approche conduira à la découverte de nouvelles propriétés.

SYSTÈMES MODÈLES ET SIMULATION QUANTIQUE

La simulation quantique vise à reproduire à l'aide de systèmes expérimentaux contrôlés des hamiltoniens modèles utilisés notamment pour l'étude des matériaux quantiques. Bien que l'idée de simulation quantique ait été émise pour la première fois dans les années 1980 par Richard Feynman, son implémentation pratique n'a vu le jour qu'au tournant des années 2000 avec l'avènement des gaz quantiques. Grâce aux propriétés de contrôle de ces systèmes, une vaste zoologie de phénomènes physiques a pu être reproduite, allant des systèmes de fermions fortement corrélés, dans l'espace libre ou dans des réseaux optiques, aux champs de jauge artificiels et aux matériaux topologiques ou encore des systèmes soumis au désordre ou aux interactions à longue portée. Le programme de simulation quantique est complémentaire des méthodes numériques et analytiques et ces différentes approches se nourrissent mutuellement en permettant de certifier leurs précisions respectives.

Plus récemment, la simulation quantique est devenue accessible à des systèmes de matière condensée, notamment suite à la réalisation de condensats d'excitons polaritons ou encore à la découverte des moirés dans les hétérostructures twistées de graphène ou de dichalcogénures de métaux de transition, qui rendent accessibles un vaste catalogue de hamiltoniens modèles et de diagrammes de phases. La simulation quantique à base de circuits quantiques a permis de simuler des systèmes à fort couplage lumière-matière dans des jonctions Josephson, mais aussi l'effet Kondo sur des degrés de liberté de charge. En outre, l'utilisation de degrés de liberté variés permet d'espérer la simulation de nouveaux états de la matière et d'étudier les lois quantiques régissant la composition des conducteurs quantiques. Ce domaine est en pleine expansion et de nouvelles lignes de recherche s'ouvrent comme la simulation de l'électrodynamique quantique dans le graphène, l'étude de systèmes hybrides combinant atomes et lumière fortement couplés dans des cavités optiques, ainsi que les molécules ultra-froides. Les années qui viennent vont connaître l'utilisation croissante de nouveaux types de simulateurs et une extension du champ d'application de la simulation, grâce à une forte synergie indispensable entre expériences et théories.

Plusieurs enjeux majeurs ont été identifiés comme des motivations pour les années futures. En tout premier lieu, il s'agira **d'étendre le champ des espèces support** et de tirer parti de la variété des atomes et molécules diatomiques pour démontrer ou simplifier des protocoles, par

exemple en utilisant des espèces avec un grand dipôle magnétique pour réaliser des microscopes à gaz quantiques plus simples ou des systèmes de Rydberg dans les atomes alcalino-terreux afin de sonder les électrons de Rydberg. Il sera par ailleurs nécessaire de **certifier le système expérimental** et de quantifier sa vraisemblance avec les équations qu'il simule. Ceci passera par la réalisation de systèmes modèles reproduisant des problèmes simples de mécanique quantique, et permettra de **passer du simulateur au solveur quantique** ou de combiner des briques élémentaires réalisées à l'aide des systèmes modèles déjà bien maîtrisés afin de simuler des hamiltoniens plus complexes dont les propriétés sont encore hors de portée des moyens théoriques ou numériques, comme le modèle de Hubbard ou les modèles de spin. Un autre objectif vise à exploiter les architectures afin de **résoudre des problèmes inverses** ou de reconstruire et certifier le hamiltonien (éventuellement effectif) décrivant la dynamique d'un système physique à partir de la mesure de ces états. De façon plus fondamentale, le **couplage entre topologie, interactions et désordre** devra être étudié plus avant. Dans ce registre, les fermions de Majorana ou les anyons non abéliens restent des supports de choix. Un autre domaine d'application qu'il s'agira d'aborder est celui des **phénomènes hors équilibre et les systèmes ouverts**, pour traiter des phénomènes fondamentaux régissant le transport, la thermalisation, ou la réalisation d'états quantiques par des phénomènes dissipatifs. Enfin, il sera possible de **sonder la physique des deux infinis**: alors que la simulation quantique s'inspire traditionnellement de problèmes de matière condensée ou de physique nucléaire, elle s'étend désormais vers d'autres domaines de la physique. Des exemples incluent la physique des hautes énergies tels que l'effet Schwinger sondé récemment dans le graphène, ou la gravité et les trous noirs analogues qui simulent des espace-temps courbes dans des fluides ou matériaux quantiques. Au-delà de ces problématiques, des théories des champs formelles pourront être sondées comme théories émergentes de systèmes complexes tels que les matériaux magnétiques frustrés.

Un **défi majeur** pour la simulation par atomes ultra-froids est d'identifier une espèce d'atomes ou de mettre au point un protocole de refroidissement qui permettra d'amener la température de l'échantillon à une fraction bien plus faible qu'un centième de la température de Fermi, pour simuler des systèmes condensés à température ambiante. Pour aboutir, ces expériences devront réussir un **défi technique** en passant par une phase de simplification pour contenir la durée et le coût de leur construction.

CIRCUITS QUANTIQUES ET SYSTÈMES HYBRIDES

PHYSIQUE QUANTIQUE MÉSCOPIQUE

L'utilisation de **circuits cohérents de phase** pour caractériser et manipuler des **quasi-particules exotiques** va

s'amplifier. Les motivations principales incluent l'utilisation de quasi-particule unique comme qubit volant, ou la découverte voire l'utilisation de particules de statistiques non abéliennes pour stocker de façon robuste l'information quantique. Cette caractérisation peut être difficile et ambiguë, comme l'attestent à ce jour les difficultés de la recherche de quasi-particules de Majorana dans les supraconducteurs topologiques. Le caractère exotique de ces excitations élémentaires requiert de nouvelles stratégies d'observation et des avancées dans la manipulation quantique d'électrons uniques: des interféromètres de Mach-Zender balistiques, le piégeage d'excitations uniques, leur dynamique assistée par des ondes sonores, des mesures de bruit renseignant sur les corrélations temporelles et une modélisation réaliste des dispositifs expérimentaux. Il s'agit d'un sujet très actif animé par une forte synergie entre théorie et expérience.

L'étude du **transport quantique de la chaleur** et de la thermodynamique des systèmes quantiques est en plein essor. Ce domaine de recherche, prometteur, mais à un stade de développement précoce, aborde des questions fondamentales de la thermodynamique de petits systèmes intriqués quantiquement. Ces études visent en particulier à mettre au point de nouvelles sondes de degrés de liberté telles que l'entropie de spin ou la calorimétrie de glissement de phase. Ces nouvelles sondes, alternatives au transport électronique, devraient permettre de caractériser les excitations exotiques susmentionnées. Expérimentalement, la limite quantique du transport de chaleur peut être atteinte dans les semi-conducteurs III-V, le graphène, ou les canaux de bord de l'effet Hall quantique fractionnaire. Cette limite quantique se signale habituellement par une violation de la loi de Wiedemann-Franz caractéristique du régime classique. Enfin, l'influence d'un gradient de température sur différents phénomènes quantiques tels que le bruit de grenaille demeure un sujet d'étude prometteur.

CIRCUITS QUANTIQUES HYBRIDES

Les **circuits hybrides** dans lesquels un ou plusieurs supraconducteurs sont couplés à des conducteurs quantiquement cohérents constituent une sonde formidable de ces derniers, grâce au contrôle de la différence de phase supraconductrice et des expériences d'interférences quantiques qui en découlent. En particulier, la détection d'états d'Andreev de spin et d'états d'Andreev hélicaux sont des découvertes récentes dont il reste encore à explorer la dynamique. Au-delà des jonctions Josephson, les circuits hybrides peuvent être constitués d'interféromètres avec plusieurs supraconducteurs, ou encore des circuits non locaux combinant supraconductivité et effet Hall quantique polarisé ou dégénéré en spin. Leurs propriétés peuvent être contrôlables: par exemple, des progrès récents sur la qualité d'interface des hétérostructures semi-conducteur/supraconducteur rendront possibles des jonctions Josephson avec un couplage spin-orbite ajustable. De même, les circuits hybrides comportant des résonateurs supraconducteurs se généralisent grâce à

leur grande sensibilité de détection, jusqu'à permettre un couplage fort à des objets quantiques individuels, voire la limite du spin unique. Des circuits hybrides permettront également de sonder les propriétés combinées d'un assemblage de matériaux de van der Waals différents, en utilisant des électrodes métalliques, supraconductrices, magnétiques, ou encore des barrières tunnel elles-mêmes en matériaux de van der Waals.

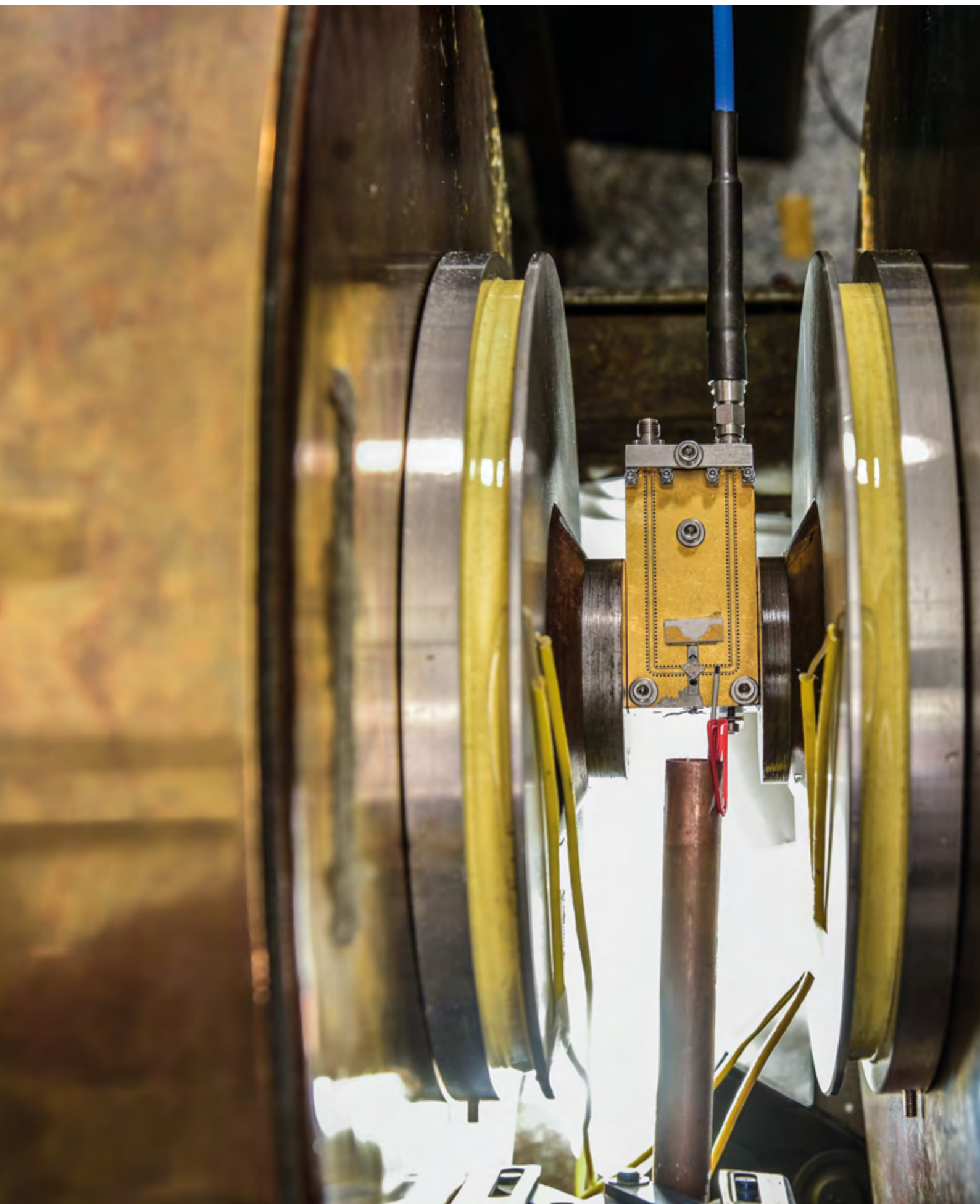
OPTOMÉCANIQUE

L'optomécanique est un domaine de recherche visant à étudier et à exploiter les interactions entre degrés de libertés électromagnétiques et mécaniques. Ces systèmes opèrent aujourd'hui dans le régime quantique, l'interaction optomécanique permettant à la fois de préparer des états non classiques du champ électromagnétique et de refroidir un mode mécanique jusque dans son état fondamental, grâce à des techniques de refroidissement laser. L'optomécanique est donc le lieu pertinent de l'étude de la mécanique quantique à l'échelle macroscopique, depuis la transition entre l'échelle micro et macroscopique jusqu'à l'étude de la gravité quantique et son rôle dans les mécanismes de décohérence (comme avec le projet spatial MAQRO). Le couplage entre un système quantique microscopique et un résonateur mécanique macroscopique devrait permettre le transfert des superpositions quantiques cohérentes vers des états mécaniques via l'**hybridation** à d'autres systèmes quantiques, comme des lacunes dans des mailles cristallines (centres NV), des boîtes quantiques et des cristaux dopés terres-rares. Ce concept d'hybridation est également déployé avec succès dans le domaine micro-onde sur des qubits supraconducteurs, dont le couplage à des résonateurs mécaniques GHz a permis de démontrer l'acheminement et le stockage d'information quantique.

L'un des principaux défis à surmonter est le contrôle du transfert thermique dans les nanostructures mécaniques ultra-cohérentes conçues pour minimiser leur couplage au bain de phonons. Parmi les avancées prometteuses dans le domaine, citons l'utilisation de pinces optiques qui permettent de créer des ensembles de nano-résonateurs en lévitation isolés des fluctuations du substrat. À l'échelle opposée, de nouveaux concepts ont récemment émergé, notamment basés sur l'exploitation de résonances ultra-hautes fréquences de type Brillouin, qui présentent le double avantage d'une grande capacité thermique et d'une énergie de point zéro très élevée.

NOUVELLES SONDES DE LA MATIÈRE QUANTIQUE : DES SOURCES AUX DÉTECTEURS

Notre compréhension accrue des phénomènes quantiques impliquera des progrès substantiels de ses moyens de mesure. Une tendance forte repose sur l'évolution de la microscopie et de la spectroscopie photoélectronique vers de hautes résolutions spatiales d'une part, et vers les mesures *in situ* et *operando* d'autre part. Une dynamique





Dispositif de mesures contenant
un nano-oscillateur spintronique.
© Hubert RAGUET / Laboratoire
Albert Fert CNRS / THALES / FIRST-
TF / CNRS Images

transverse à la plupart des techniques expérimentales consiste à développer de telles sondes locales résolues en temps et de sonder des propriétés dépassant la seule répartition de la charge et du spin.

SONDES DE MAGNÉTISME

Les sondes de champ magnétique servent à mesurer autant le magnétisme de spin que le magnétisme orbital. Parmi les sondes récentes, mentionnons celles à base de lacunes dans des cristaux, dits centres colorés, dont l'état de spin dépend du champ magnétique local et est détectable optiquement, et les spins uniques cohérents. Si les centres NV du diamant ont été les plus utilisés jusqu'ici et donnent déjà lieu à la commercialisation de magnétomètres, d'autres se développent dans le silicium, le germanium, dans SiC sous forme de bi-lacunes, et dans le nitrure de bore hexagonal, intégrables à des hétérostructures de van der Waals. Ces sondes sont particulièrement utiles pour l'imagerie de nanostructures magnétiques ou de transitions supraconductrices sous pression. Des développements technologiques récents laissent présager des mesures de résonance magnétique nucléaire à l'échelle d'un seul atome. De nouvelles sondes en champ proche sont actuellement développées en France et méritent d'être soutenues, telles que les nanoSQUID sur pointe, balayables, qui permettent des mesures locales du champ magnétique et de la chaleur. Elles permettront de sonder des échantillons mésoscopiques et de détecter les centres de dissipation ou de mettre en évidence les propriétés topologiques telles que le nombre de Chern dans des matériaux 2D. Mentionnons également les sondes à base de microrubans de magnétorésistance géante, optimales pour la mesure des réponses de matériaux 2D à un champ magnétique hors du plan. Elles permettent l'exploration du magnétisme orbital et de courants de bord non accessibles par des mesures plus conventionnelles.

MICROSCOPIE À EFFET TUNNEL

À l'origine, le microscope à effet tunnel (STM) se démarquait par sa capacité à imager des surfaces, en sonder les propriétés électroniques à l'échelle atomique, et manipuler des atomes un par un. S'est ajoutée plus récemment la spectroscopie sub-meV permettant de visualiser des gaps d'énergie, des orbitales moléculaires, des modes de vibration, des états magnétiques et des liaisons moléculaires. Le courant tunnel d'un STM permet également d'exciter avec une résolution spatiale sub-nanométrique la fluorescence de molécules se comportant comme des sources de photons uniques. Les progrès techniques les plus récents concernent les mesures de courant tunnel, associées à des excitations micro-ondes permettant la détection de la résonance de spin électronique de matériaux magnétiques. Ces progrès portent aussi sur la manipulation cohérente de spins atomiques individuels sur une surface et l'étude de l'influence du spin nucléaire. Des mesures de bruit dans la gamme radiofréquence par un circuit résonant devraient fournir une information

locale sur les quasi-particules de supraconducteurs non conventionnels, voire topologiques. En couplant une détection optique au STM, la photoluminescence peut être exaltée par la cavité formée entre la pointe et la surface, et résolue à l'échelle atomique, pour sélectionner des émetteurs uniques. Des expériences ont aussi été réalisées à l'échelle moléculaire, démontrant des résolutions pouvant surpasser le seuil du μeV , et une résolution temporelle ultime dans le domaine femto voire attoseconde, donnant accès à la caractérisation et au contrôle des spectres vibrationnels des états excités.

MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE EN TRANSMISSION (MET)

En imagerie, les résolutions spatiales ultimes sont maintenant limitées par l'agitation thermique et une tendance émerge visant à exploiter les propriétés quantiques des électrons libres produits. Par exemple, l'injection de faisceaux laser dans un MET ouvre un nouveau champ d'études basé sur la cohérence quantique des électrons libres. Les techniques de 4D MET ou d'holographie utilisent déjà au maximum l'information sur la phase des électrons et permettent l'imagerie de champs électriques et magnétiques statiques dans l'échantillon. Par ailleurs, la sélection de la symétrie de l'état quantique de l'électron libre devrait permettre des mesures de dichroïsme magnétique à l'échelle atomique. L'arrivée de microscopies résolues en temps (sub-ps) permettra d'accéder à une combinaison unique de résolutions spatiale, temporelle et spectrale pour l'étude de systèmes photoniques ou optoélectroniques et de matériaux quantiques émergents. Par ailleurs, le développement de techniques corrélatives électron/électron ou électron/photon est en pleine expansion, permettant par exemple d'effectuer des expériences allant de l'optique quantique dans un MET à la spectroscopie attoseconde ou μeV . Ces avancées reposeront sans nul doute dans les années à venir sur le développement des détecteurs à électrons directs, en particulier résolus en temps, et d'instrumentation innovante incluant l'utilisation de nombreux stimuli extérieurs (température, en particulier cryogénique, courant, laser...) qui iront de pair avec la croissance des besoins en stockage et en analyse des données.

PHOTOÉMISSION

Dans le domaine de la photoémission, nous observons des évolutions similaires en **physique de la matière condensée** et en **physique moléculaire**, par exemple avec la résolution angulaire de la distribution d'électrons émis en ARPES (spectroscopie de photoémission résolue en angle) en physique de la matière condensée et de la distribution angulaire par imagerie de vitesse en physique moléculaire, l'amélioration de la résolution temporelle, et l'exploitation d'effets de dichroïsme. La photoémission directe et inverse résolue en spin se renforcera pour l'analyse de la matière condensée et nous pouvons anticiper que le développement en phase diluée de l'analyse systématique des photoélectrons émis en fonction de

leur spin apportera la même richesse d'informations. De nombreux sujets émergents reposent sur une **sélectivité utilisant** des effets de chiralité ou de moment orbital de l'électron.

De nouvelles méthodes de caractérisation des molécules exploitent le dichroïsme circulaire grâce à des sources cohérentes basées sur la combinaison de deux peignes de fréquences ou sur le rayonnement synchrotron où la polarisation est très bien définie. Dans ce contexte, l'utilisation de lumière possédant un **moment orbital** sera de plus en plus explorée pour donner accès à des mesures et un contrôle complémentaire lors de l'interaction rayonnement-matière. Les techniques *operando*, qui sont utilisées dans certains domaines de la chimie, font leur apparition en ARPES. À cet égard, les sources laser compléteront utilement les lignes de lumière synchrotron. Les méthodes d'imagerie en ARPES sont en plein développement, ainsi que leur extension vers les rayons X. Les techniques pompe-sonde donneront accès à de nouveaux phénomènes hors équilibre. Elles permettront de suivre les dynamiques électroniques, de modifier les structures de bande des matériaux, d'étudier les paramètres réticulaires. Une perspective très intéressante est le contrôle des transitions de phase induites par les photons.

SPECTROSCOPIES

Les techniques bien établies dans le domaine de l'optique pulsée cohérente, comme l'amplification par dérive de fréquences pour les peignes de fréquences, font leur entrée en spectroscopie THz ou micro-onde et en élargissent les champs d'applications. Les trains d'impulsions THz permettent de visualiser les vibrations cohérentes et la dynamique de molécules uniques ou de phonons, et la rapidité d'obtention des spectres laisse envisager des applications analytiques. Ces nouvelles techniques stimuleront des recherches sur les mouvements collectifs dans des systèmes complexes comme des molécules biologiques, la solvation, la détection d'espèces instables et de radicaux, et de celles présentes dans les plasmas, dans le milieu interstellaire, ou intervenant en physico-chimie de l'atmosphère. À cet égard, la miniaturisation des sources dans le domaine THz favorise les analyses *in situ* y compris dans le domaine de la spectroscopie haute résolution (instruments embarqués, santé) et de nombreux progrès techniques y sont attendus. Enfin, **de nouveaux champs dans la spectroscopie THz** devraient s'ouvrir grâce à l'adaptation future de méthodes de détection très efficaces dans le domaine de l'infrarouge (IR). De plus, combiner le champ magnétique et les techniques IR et THz permettra d'étudier les excitations électroniques, magnétiques et phononiques aux basses énergies dans divers systèmes. Des améliorations de leurs résolutions spatiales et temporelles permettront l'exploration de structures nanométriques et de phénomènes hors-équilibre.

L'extension au domaine THz de méthodes et protocoles déjà opérationnels dans le domaine micro-onde

est en grande partie permise par l'émergence de nouvelles sources et détecteurs. Les ondes THz ont en effet l'avantage d'être transmises et insensibles aux perturbations, avec des applications possibles en cryptographie quantique. Parmi les sources THz, les lasers à cascade quantique peuvent produire des peignes de fréquences sources de lumière non classique (lumière comprimée). Côté capteurs, des progrès sont attendus dans la détection de photons uniques grâce à des matériaux 2D, y compris twistés, qui possèdent une densité de porteurs de charges de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle des matériaux utilisés dans l'IR. Enfin, l'interférométrie aux fréquences THz offre une détection dans un domaine spectral où les détecteurs sont rares.

Dans d'autres domaines spectraux, de grands instruments comme les lignes de lumière de SOLEIL et sa prochaine mise à niveau, ainsi que le développement des sources innovantes, permettront l'analyse *in situ* ou *operando*. Une partie des expériences d'imagerie cohérente actuellement menées sur lasers à électrons libres pourra également s'effectuer au synchrotron SOLEIL, qui gagnera en brillance et assurera une haute cadence sur plusieurs dizaines de lignes en parallèle.

La gamme spectrale des peignes de fréquences optiques continue à s'étendre vers les hautes énergies pour étendre la spectroscopie double peigne à une gamme de fréquences optiques plus élevées. La maturité atteinte par certaines techniques de spectroscopies expérimentales ouvre la voie à des expériences complexes qui les couplent à des dispositifs *operando*, comme ceux dérivés de la spectrométrie de masse ou de la microfluidique et des méthodes de détection résolues en temps, en angle et en énergie. Deux défis sont à relever pour atteindre cette synergie : il sera tout d'abord nécessaire de mettre au point des sources à haut taux de répétition qui restent compatibles avec les contraintes expérimentales en termes d'exploration de l'espace des paramètres de contrôle. D'autre part, la complexité et la quantité des données à traiter devront faire de plus en plus appel à des méthodes nouvelles telles que celles issues de l'intelligence artificielle.

Enfin, dans une grande partie des domaines cités dans cette prospective, supraconducteurs, liquides de spins, multiferroïques, matériaux topologiques, matériaux magnétiques, textures magnétiques, skyrmions, etc., la diffusion des neutrons joue un rôle clef, de par sa capacité à révéler les corrélations entre spins, à mesurer la dispersion des excitations collectives, ou encore le spectre des excitations déconfinées. Innover en proposant de nouveaux concepts instrumentaux, disposer d'infrastructures de recherche permettant ce type de mesures constitue un atout de premier plan, dans un contexte où la compétition internationale est ardue.



Extraction des principaux réseaux de faisceaux de substance blanche cérébrale chez l'homme à partir d'images d'IRM (imagerie par résonance magnétique) de diffusion. © Antoine GRIGIS/Université de Strasbourg/CNRS Images

Physique du vivant

RÉSUMÉ

La physique du vivant couvre des domaines extrêmement variés qui se regroupent autour de trois thématiques principales : **l'instrumentation pour le vivant**, les **systèmes modèles** pour l'expérimentation, et les **concepts et modèles théoriques**. Les perspectives qui découlent de ce domaine de recherche se trouvent d'une part dans les enjeux sociétaux, notamment en **lien avec la santé**, d'autre part dans la **compréhension fondamentale** de systèmes complexes que sont les systèmes vivants. La multiplicité des échelles d'espace et de temps mises en jeu dans le vivant, l'organisation et la dynamique spécifiques à ces échelles, ainsi que leur couplage, présentent des défis pour la physique de la matière complexe à l'équilibre et hors d'équilibre. Par ailleurs, ces approches physiques permettent souvent de conceptualiser et de modéliser des phénomènes génériques observés dans des systèmes vivants très différents, et ainsi faire un pont de compréhension entre des disciplines qui se trouvent scindées en domaines différents de la biologie.

Comprendre comment la matière vivante est organisée nécessite une quantification et une compréhension de ce qu'est la **matière active** et d'en prendre en compte les contraintes, comme la paroi rigide de certains types de bactéries, ou la matrice extracellulaire des tissus. La matière vivante peut aussi être génératrice de contraintes, par exemple en créant une tension au pourtour d'un amas cellulaire due à la contraction ou à l'extension de chaque cellule, et ainsi se déformer et croître par des effets collectifs qui font l'objet de modélisation physique à toutes les échelles. Enfin, l'auto-organisation ou l'auto-assemblage des systèmes vivants, comme par exemple le remodelage du cytosquelette au cours de la division cellulaire ou la cicatrisation des tissus, sont régis par des lois couplant les propriétés électro-magnétiques, la signalisation ou la biomécanique et intégrant des boucles de rétroaction suivant les stimuli externes. Comprendre cette complexité est un défi pour la physique.

Les systèmes vivants sont une source d'inspiration pour explorer de nouvelles questions de **physique hors d'équilibre**. L'utilisation de systèmes modèles (biochimie de synthèse, mais aussi bactéries, microalgues, voire animaux) offre une variation des paramètres expérimentaux permettant d'affiner les modèles ou de tester des prédictions théoriques (rhéologie, transitions de phase, etc.).

Quantifier la conversion et l'utilisation de **l'énergie chimique** (par exemple la consommation d'adénosine-triphosphate) dans la matière

active passe par la connaissance et la compréhension des mécanismes de transduction de l'énergie, du rôle des flux d'énergie et de leurs fluctuations spatio-temporelles, ainsi que des mécanismes moléculaires de régulation associés.

Le **traitement de l'information** dans le vivant mène à une prise de décision (par exemple lors de l'initiation du développement d'un membre ou d'un organe) qui peut être abordée par des approches physiques aussi diverses que l'hydrodynamique, le traitement de l'information génétique, ou la biomécanique.

La **modélisation physique** nourrie et inspirée de modèles expérimentaux épurés, quantifiables et reproductibles permettra de faire varier les paramètres du système et inspirer et nourrir les hypothèses des lois physiques du vivant. Une approche globale prenant en compte tous ces aspects, ainsi que les variables des systèmes vivants ou inspirés du vivant, pourra alors émerger.

Le développement de **nouveaux instruments d'imagerie**, optique, par rayons X, électronique, ou acoustique, permettra d'avoir accès aux informations aux petites échelles de temps et d'espace et nourrir les approches physiques intégrant toutes ces échelles auxquelles s'opèrent des changements dans la matière vivante.

Physique du vivant

INTRODUCTION

Les **systèmes vivants**¹ sont constitués de sous-unités qui relient les échelles allant du microscopique (molécules) au macroscopique (des organismes jusqu'aux populations et écosystèmes) avec une organisation définie et dynamique, parfois déterministe, souvent stochastique. La question centrale abordée par la **physique du vivant** est de savoir comment ces sous-unités fonctionnent et s'auto-organisent passivement ou activement dans l'espace et le temps, en utilisant les apports d'énergie libre et les échanges d'information, pour assurer des fonctions biologiques. Le couplage entre **matière, énergie et information** est ainsi important, car il permet aux systèmes vivants de s'adapter à des contraintes fluctuantes dans le temps et l'espace et permet l'émergence de phénomènes d'auto-organisation et leur évolution.

L'approche de la physique diffère de celle de la biologie de par son point de vue et sa méthodologie. Elle cherche à décrire les mécanismes du vivant en utilisant les lois fondamentales de la physique, elle met en évidence des nouveaux concepts et potentiellement des nouvelles lois physiques issues de la complexité des systèmes vivants. Les physiciennes et physiciens du vivant développent de nombreuses interactions avec d'autres domaines de la physique (instrumentation, recherche de solutions technologiques), mais aussi de l'informatique, des mathématiques, de la biologie, de la chimie, de l'ingénierie. L'ensemble de ces connaissances contribue de manière fondamentale non seulement à la physique du vivant, mais aussi à d'autres branches de la physique telles que la physique de la matière et les systèmes complexes, la physique pour la santé et l'environnement, le développement de systèmes biomimétiques et de matériaux bio-inspirés aux propriétés innovantes. Ces connaissances peuvent déboucher sur des applications dans les biotechnologies.

Cette prospective est présentée à travers six parties. Les trois premiers concernent les grands concepts communs à l'ensemble des systèmes vivants, à savoir, l'organisation de la matière, la conversion de l'énergie, et le traitement de l'information. Ils sont suivis par les parties concernant les mécanismes d'évolution et d'adaptation, la matière

et les matériaux bio-inspirés, le biomimétisme, et finalement l'instrumentation et les défis technologiques. Certains sujets sont en phase de maturité et toujours actifs, et pour lesquels la France y est l'un des acteurs majeurs sur la scène mondiale, d'autres sont à des stades précoces de développement.

ORGANISATION DE LA MATIÈRE

Les systèmes vivants ont été historiquement étudiés du point de vue de la physique de la **matière condensée**, de la **mécanique statistique** et de la physique de la **matière molle**, afin de caractériser la structure et l'organisation des composants fondamentaux (e.g. l'étude de la structure et de la dynamique de molécules individuelles), ainsi que leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques globales et leur rhéologie. Par exemple, les biopolymères cellulaires et les membranes ont été initialement décrits dans ce cadre, car l'énergie d'interaction de leurs constituants est de l'ordre de l'énergie thermique. Les systèmes biologiques sont toutefois intrinsèquement des systèmes multi-échelles à interaction multi-agents, où, à l'échelle locale, chaque constituant consomme de l'énergie. C'est pourquoi la physique de la **matière active**, développée pour décrire les propriétés physiques des mouvements collectifs de «particules» (protéines motrices, pompes transmembranaires, colloïdes, bactéries, animaux, individus, véhicules...), capables de s'auto-propulser dans un milieu sans l'action d'un champ de force externe, décrit potentiellement une partie importante des systèmes vivants. De même, les changements d'état de la matière biologique peuvent être modélisés dans le cadre de la théorie des **transitions de phase**, et des **phénomènes critiques et non linéaires**. En effet, suite à des perturbations de faible énergie, ou par des mécanismes de rétroaction, les systèmes vivants peuvent transiter vers un nouvel état dans l'espace des paramètres ou dans l'espace des phases. L'**instabilité** en tant que moyen d'apparition de phénomènes collectifs a été étudiée dans des systèmes auto-oscillants (résultant du mouvement collectif de moteurs moléculaires) tels que les stéréocils, le trafic intracellulaire, le mouvement collectif des cellules et d'organismes.

L'étude des systèmes vivants déposés sur des surfaces planes a permis de décomposer certains mécanismes

¹ Nous utiliserons le terme physique du vivant au lieu du terme biophysique en raison d'une forte évolution des thématiques de cette discipline au cours des vingt dernières années, et du rôle important des concepts physiques pour guider la compréhension des phénomènes biologiques, dans les approches à la fois expérimentales et théoriques.

moléculaires des fonctions du vivant. Aujourd'hui, de nouvelles techniques permettent de visualiser les systèmes vivants dans des situations plus physiologiques, dans leur environnement à trois dimensions. Nous citons par exemple les nouvelles techniques de microscopie volumétrique, d'impression 3D, de manipulation (microscopies 3D, pinces magnétiques et optiques, microfluidique et microfabrication, modelage 3D) et d'analyse de données.

PHYSIQUE DES ACIDES NUCLÉIQUES, DES ENZYMES ET DES GÉNOMES

La caractérisation de la structure des acides nucléiques et des enzymes ainsi que leurs interactions moléculaires par spectroscopie de force à molécule unique (pinces optiques ou magnétiques) sont maintenant des sujets établis. La tendance future est l'étude des **complexes multiprotéiques** en interaction avec les acides nucléiques, le multiplexage de l'analyse et la mise au point d'outils pour sonder de nouvelles structures, la cinétique statistique des interactions et/ou la caractérisation de la stabilité de certains complexes pour des applications pharmaceutiques (ex. vaccins à ARNm).

L'utilisation extensive d'outils d'imagerie super résolue et de suivi de molécule unique, couplés à l'analyse haut débit et au séquençage de l'ADN ont permis d'initier l'analyse quantitative des propriétés d'organisation spatiale (ex. cartes de contact) et temporelle (dynamique des complexes de protéines et protéines/chromatine) des **génomés** (eucaryote et procaryote) ainsi que l'étude des propriétés mécaniques et rhéologiques du **noyau** et de la **chromatine**. La physique statistique et des polymères permettent de faire évoluer les modèles et les concepts. Cependant les lois d'organisation et de la dynamique interne entre différentes régions des génomes sont loin d'être suffisamment comprises pour expliquer les mécanismes de **contrôle épigénétique** et comment le noyau interagit avec le reste de la cellule.

Des adaptations de techniques de micromanipulation (e.g. traction magnétique) combinées à des techniques de pointe de marquage multicolore et à l'imagerie sont nécessaires pour répondre à ces questions. Le noyau est un exemple de la façon dont les fonctions biologiques peuvent conduire à des états physiques spécifiques tels que des **polymères enchevêtrés ou des condensats moléculaires**, et affecter les **propriétés rhéologiques** locales. Les techniques d'inférence et la physique des polymères, à l'équilibre et hors d'équilibre, offrent des méthodes pour décrire l'organisation du système, ainsi que les conformations moléculaires et la dynamique. De même, il apparaît nécessaire de **corrélérer les différentes échelles spatiales** qui décrivent à la fois le fonctionnement du génome à celles de la dynamique de la cellule entière. Ainsi, un nouveau champ de la physique du vivant se développe à l'échelle mésoscopique, entre l'échelle atomique ou moléculaire et celle de l'organisme. Le but ultime est de comprendre quels facteurs déterminent le contrôle épigénétique des cellules et des tissus lors d'étapes fon-

damentales de la vie (développement embryonnaire ou émergence de pathologies comme le cancer).

Si l'ADN est l'élément par excellence qui décrit la notion d'information dans les systèmes biologiques, c'est un succès de la physique moderne d'avoir proposé que la structure et l'action mécanique sur l'ADN nucléaire sont des éléments déterminants pour le fonctionnement cellulaire. Également, la physique s'attache à comprendre le **rôle d'autres interactions et couplages** (e.g. électromagnétique, acoustique) agissant sur l'**état des cellules dans les tissus**. Enfin, comprendre l'organisation et la synchronisation des événements cellulaires et génomiques dans l'extrêmement petit volume bactérien (~1 fL) représente un défi pour appréhender les lois d'auto-organisation biologique chez les procaryotes ouvrant à terme des perspectives en santé pour la conception de médicaments alternatifs aux antibiotiques classiques.

LE CYTOSQUELETTE ET L'ORGANISATION DES FILAMENTS DU CYTOSQUELETTE

Bien qu'il s'agisse d'un sujet mature, de nombreuses questions restent à explorer, telles que la transmission des forces au noyau, mais aussi la réorganisation du cytosquelette en tant que phénomène de séparation de phases (condensats moléculaires/compartiments sans membranes) qui a été considéré jusqu'à présent comme un processus d'auto-assemblage. Parmi d'autres sujets potentiellement liés au cytosquelette, citons l'auto-assemblage de structures supramoléculaires liées aux membranes, telles que les complexes de pores nucléaires (en association avec l'ARN) et les moteurs rotatifs. Le contrôle précis de la production de protéines et de l'environnement physico-chimique fournira les conditions nécessaires à l'étude de l'auto-organisation, de la structuration et des instabilités résultantes de l'interaction de nombreux acteurs moléculaires et, en perspective, au développement de nouveaux matériaux bio-inspirés.

SYSTÈMES MULTICELLULAIRES

L'auto-organisation dans ces systèmes se présente comme une réponse collective des cellules à des signaux chimiques internes et/ou externes (morphogènes, pH, O₂, nutriments) et physiques (mécaniques, hydrodynamiques, électriques, magnétiques, température) au cours d'une myriade de phénomènes tels que, entre autres, la **morphogenèse pendant le développement embryonnaire**, la **formation de biofilms bactériens**, la **cicatrisation des tissus**, la **formation de tumeurs et de métastases**, la **morphogenèse des plantes**. Comment les signaux et contraintes physiques et chimiques agissent-ils de concert pour que les formes apparaissent et que les fonctions émergent? Quelles sont les forces exercées par les cellules entre elles et avec leur environnement? Telles sont les questions actuellement abordées en étroite collaboration avec les biologistes et qui seront au cœur des recherches dans les années à venir. Les systèmes modèles vont des monocouches épithéliales

en 2D aux sphéroïdes en 3D en passant par les colonies bactériennes et les systèmes animaux (invertébrés et vertébrés). Le domaine des **organoïdes**, en plein essor, offre d'excellentes possibilités de recherche sur l'**auto-organisation des tissus** et la génération de formes suite au phénomène de **brisure de symétrie**, dans des conditions *in vitro* bien contrôlées. Du point de vue théorique, tous ces systèmes multicellulaires sont simulés à l'aide de plusieurs modèles numériques et analytiques (particules browniennes actives, modèle de Potts, modèle de vertex, mousses et cristaux liquides nématiques). Des études prometteuses traitent du **rôle des défauts topologiques et des contraintes géométriques** dans l'organisation des structures multicellulaires planaires (cicatrisation, biofilms, etc.), dans leur développement vers une structure 3D et dans l'organisation des organismes unicellulaires en organismes multicellulaires. L'un des principaux défis consiste à étendre les formalismes actuels de la matière active pour inclure les contributions de différentes échelles afin de décrire les phénomènes collectifs et émergents.

MORPHOGENÈSE ET CROISSANCE DES PLANTES

Les cellules végétales se différencient des cellules animales par leur paroi cellulaire rigide, non transparente et complexe et par l'impossibilité de les isoler pour des études sur cellule unique. Par ailleurs, il n'existe pas de bons systèmes artificiels de cellule végétale en croissance, et dans les systèmes réels, les conditions de croissance sont souvent difficilement reproductibles. De plus les modèles physiques de la morphogenèse, certes très poussés, sont encore insuffisants, avec de nouveaux axes et observables à explorer, d'autant que les approches menées sur cellule animale ne sont pas toujours transposables au monde végétal. Les recherches futures se concentreront sur les mécanismes qui régissent la morphogenèse des plantes. Il s'agira notamment d'étudier les forces intra et intercellulaires, la communication intercellulaire et les réseaux de régulation génétique qui régissent la **croissance et la formation de la forme des plantes**, comprendre comment les cellules végétales et les tissus s'adaptent à de forts gradients de pression, par exemple dans la plante de grande dimension, l'influence de l'environnement (lumière, gravité, température, stress mécanique et hydrique, champ électrique...). Ces études s'appuieront sur le développement de nouvelles technologies d'imagerie sur objets non-transparents et volumiques (RMN, tomographie de rayons X...). Il s'agira aussi de développer des approches quantitatives, avec un aller-retour entre simulation et expérience afin d'intégrer des données provenant de plusieurs échelles, des niveaux moléculaires et cellulaires à la plante entière, afin de construire des modèles prédictifs du développement et de la croissance des plantes.

PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES

Elles font partie intégrante de toute matière biologique et influencent la manière dont les liquides s'écoulent dans

les capillaires, les membranes se déforment, les cellules se divisent ou les embryons se développent, pour ne citer que quelques exemples. Malgré une large palette de techniques allant de la micro-échelle (AFM, microrhéologie passive ou active) à la méso-échelle (aspiration par micropipette, indenteurs et systèmes de confinement, gouttelettes déformables), les **mesures rhéologiques non invasives** dans les cellules et les tissus vivants restent un défi. L'élastographie ultrasonore, les sondes intracellulaires codées génétiquement (GEM), la microscopie de Brillouin ou la tomographie par cohérence optique sont parmi les approches prometteuses dans cette direction. De plus, la nature « modèle dépendant » des approches rhéologiques mène parfois à des résultats incompatibles entre différentes techniques et nécessite une approche théorique approfondie et complète.

PHASES DE LA MATIÈRE BIOLOGIQUE

Un domaine d'intérêt croissant en biologie cellulaire est la **séparation de phase liquide-liquide** (*liquid-liquid phase separation*, LLPS), un mécanisme qui explique la présence de larges complexes protéiques (ou protéines-acides nucléiques) et de compartiments sans membrane dans le cytoplasme, et qui est classiquement décrit comme une coexistence de phases. Un effort doit être entrepris pour l'étude des LLPS qui, bien qu'ayant été déjà bien décrites à l'équilibre, peuvent se produire hors équilibre dans les systèmes vivants. En effet, elles peuvent activer ou modifier des réactions biochimiques spécifiques, telles que la transcription, l'accumulation ou la dégradation des protéines, tout en pouvant également inhiber des interactions par des contraintes stériques. En outre, il a été démontré qu'elles jouent un rôle dans des situations pathologiques (en particulier les maladies neurodégénératives) et potentiellement aussi dans le contrôle épigénétique des génomes. Leur formation, leur stabilité et leur dynamique, le rôle de l'activité dans leur régulation, sont autant de questions émergentes pour la physique des systèmes vivants. Des outils sont actuellement en cours de développement, tels que les condensats codés génétiquement dans les cellules, où les paramètres physico-chimiques peuvent être mieux contrôlés. L'imagerie multimodale (voir les recherches en cours au synchrotron SOLEIL) permet aussi d'étudier les condensats de protéines, de leur structure *in vitro* et *in vivo* à leur localisation au sein des cellules. Depuis la thermodynamique des condensats moléculaires beaucoup de questions nouvelles émergent sur la matière biologique en **conditions extrêmes** (température, pression, pH, lumière) ainsi que sur la régulation des fonctions vitales et l'adaptation des **organismes extrémophiles**.

TRANSITIONS DE PHASE

Plusieurs systèmes biologiques sont déjà décrits comme le résultat de transitions de phase ou de phénomènes de **brisure de symétrie** par les biologistes (transition épithélio-mésenchymateuse, polarité cellulaire, polarisation électrique des neurones, organisation des tissus...). Pour

un théoricien, il s'agit de proposer des modèles simples et universels pour décrire de **nouvelles phases de la matière** et les mécanismes qui maintiennent les systèmes biologiques **proches d'un ou plusieurs états dans lesquels la probabilité de transiter doit être évaluée**. Expérimentalement, en utilisant les principes de la théorie du contrôle, un système biologique peut être maintenu dans un état critique en lui imposant certaines conditions et en les modulant en fonction de la réponse. La démocratisation de **l'optogénétique, de la microfabrication et des outils microfluidiques** permet le contrôle spatio-temporel de la stimulation d'une cellule à la fois, de l'expression d'un gène spécifique, de l'activation pharmacologique. Ces approches, combinées à l'introduction de nouveaux biocapteurs et de nouvelles méthodes de microscopie, nous permettront de sonder la **dynamique de systèmes biologiques** de plus en plus complexes et physiologiquement pertinents.

RÉSEAUX HIÉRARCHIQUES

Une caractéristique particulière de nombreux systèmes biologiques est la connexion entre différentes parties par le biais de réseaux physiquement connectés. Ces réseaux sont optimisés pour transporter de la matière (cytosquelette), de l'air (poumons), des fluides (systèmes lymphatiques, vaisseaux sanguins, transport de la sève dans les plantes), des informations (neurones), ou comme dans le stroma pour servir de matrice, d'échafaudage aux cellules afin de construire ou d'ancrer les organes. Ils présentent souvent une **allométrie**. La question de savoir si cela reflète une optimisation et quels sont les paramètres qui contrôlent cette allométrie est toujours d'actualité. Des développements récents en microscopie ouvrent des questions sur l'interface entre ces réseaux et les phénomènes de transport associés, par exemple l'échange de nutriments et de gaz au niveau du cerveau ou le transport actif axonal et dendritique, et l'altération dans des situations pathologiques.

CONVERSION ET UTILISATION DE L'ÉNERGIE

La conversion de l'énergie libre est un domaine historique entre biophysique et biochimie, se focalisant sur les mécanismes de la conversion de la lumière solaire (photosynthèse) ou des ressources matérielles en énergie sous forme d'ATP, par exemple, par les mécanismes de respiration. Ce processus de conversion a lieu au sein d'organelles centrales chez les eucaryotes, mitochondries (plantes et animaux) et chloroplastes (plantes), et dans la paroi bactérienne chez les procaryotes, contrôlant ainsi des processus actifs tels que la synthèse, la motilité et l'homéostasie cellulaire. Ces processus ne sont encore que rarement caractérisés aux échelles cellulaires et subcellulaires. La distribution spatio-temporelle des ressources énergétiques dans les cellules et tissus reste à être étudiée, de même que celle des gradients ioniques à travers des membranes lipidiques dans des conditions fortement dominées par les fluctuations (en dessous du millimètre et

de la milliseconde). Enfin, l'aspect du fonctionnement des systèmes biologiques en conditions de **ressources finies** a été seulement partiellement abordé dans les colonies bactériennes ou les processus de traduction ribosomale. Ces exemples illustrent **le lien intrinsèque entre énergétique et flux d'information** gérés par les cellules. Par exemple, la synthèse ribosomale des protéines est le processus cellulaire le plus coûteux en énergie, mais aucun modèle physique ou analyse bioinformatique n'est en mesure de prédire le taux réel de production ainsi que l'énergie nécessaire pour synthétiser une protéine. Le développement de nouvelles méthodes d'investigation, couplant l'analyse des données bioinformatiques avec les modèles physiques de transport se révèle ainsi nécessaires en biologie, santé et biotechnologies.

MESURES DES PROCESSUS ÉNERGÉTIQUES

Les processus dans les systèmes vivants sont non seulement hors-équilibre mais aussi souvent en régime de fortes fluctuations (e.g. thermiques, de concentration moléculaire, d'état biochimique). Les études expérimentales en molécule individuelle et de thermodynamique des petits systèmes ont initié le développement de disciplines comme la **thermodynamique stochastique** et la **cinétique statistique**. Ces disciplines permettent de mesurer/calculer non seulement des valeurs moyennes des observables physico-chimiques (flux de charge, travail produit, dissipation et production d'entropie...), mais aussi d'extraire des informations sur les mécanismes de transformation de l'énergie libre aux échelles micro et nanoscopiques par l'étude de leurs fluctuations. L'investigation des **processus de conversion et dissipation de l'énergie** à l'échelle des molécules et des cellules requiert des développements instrumentaux faisant appel aux nanosciences et aux technologies quantiques (e.g. nano-thermométrie, nano et microcalorimétrie, nano et microfluidique, sondes carbonées, photochimie) pour mesurer les variables fondamentales de l'homéostasie cellulaire et sub-cellulaire (température absolue, concentrations en charges électriques, ATP, ou autre nucléotide, pH...). L'apport de nouveaux biomarqueurs devrait permettre de monitorer le **métabolisme** mitochondrial ou cellulaire pour remonter jusqu'aux échelles embryonnaires et tissulaires. Ce type d'effort est multidisciplinaire et demande l'interaction de l'ensemble des nanosciences (chimie, physique, biochimie, électronique) avec des implications prévisibles en santé (métabolisme, cancer) et en sciences de l'environnement et de l'énergie (biomasses, métabolisme bactérien des composts azotés et carbonés).

ÉNERGIE, INFORMATION, ORGANISATION PAR DES PHÉNOMÈNES QUANTIQUES

L'étude de la **photosynthèse** et des **processus enzymatiques** apporte la signature de phénomènes de **biologie quantique** en milieu aqueux et à température ambiante (conversion lumière-énergie, effet tunnel, cohérence quantique...). Ces phénomènes qui connaissent un es-

sort à l'international doivent être regardés avec soin par la communauté de physique française tant du point de vue des principes (y compris sur ceux du calcul quantique) que des applications technologiques. L'observation d'effets collectifs ou de cohérences d'états stimulés par l'apport d'énergie dans des populations de protéines solubles pourrait révéler ou annoncer l'existence de nouvelles interactions à moyenne portée, pouvant jouer un rôle dans les processus d'organisation et de régulation des condensats moléculaires. Ces processus hors-équilibre thermodynamique soulignent la connexion subtile entre organisation de la matière, transmission de l'information et utilisation de l'énergie dans les systèmes vivants.

MOTILITÉ CELLULAIRE

On appelle motilité cellulaire le processus physico-chimique par lequel se meut une cellule animale grâce à sa machinerie moléculaire. Ce processus est éminemment coordonné, complexe et hors équilibre thermodynamique. Pour des cellules en suspension, il s'agit de décortiquer les techniques de nage dans des environnements variés, de comprendre le fonctionnement et la coordination des complexes moléculaires mettant en mouvement flagelles et cils. Pour les cellules adhérentes, il s'agit pour la cellule de coordonner ses déformations avec les interactions adhésives ou de friction avec l'environnement. D'autres processus biologiques comme la phagocytose et la division cellulaire font à peu près intervenir les mêmes partenaires au niveau subcellulaire. La compréhension de ces mécanismes reste parcellaire. Les questions ouvertes sont par exemple : l'origine du contrôle de la dynamique du cytosquelette, de la polarité des cellules, les mécanismes de transmissions des forces de l'extérieur vers l'intérieur « profond » de la cellule (son noyau) et réciproquement. Une description multi-échelle globale depuis les protéines des complexes adhésifs et de régulation du cytosquelette (10 nm) jusqu'aux déformations de la cellule (10 µm), à la fois mécanique, fluide (transport dans le cytoplasme) et métabolique est attendue. Des approches expérimentales avec une large gamme de microscopies depuis la microscopie électronique, la super-résolution jusqu'à la microscopie multi-spectrale 3D, avec des techniques perturbatives devront continuer à être combinées à des approches théoriques et numériques. L'IA devrait révolutionner l'analyse d'image des mouvements cellulaires dans des environnements complexes en particulier denses et 3D.

HOMÉOSTASIE

En biologie, l'homéostasie est un phénomène par lequel une propriété est maintenue autour d'une valeur optimale grâce à un processus de régulation, par exemple la température des organismes ou la composition sanguine. Parmi les questions actuelles très débattues, on peut citer l'homéostasie du pH intracellulaire ou du potentiel de membrane, la régulation du volume de la cellule et celui du noyau en conditions physiologiques (croissance d'un épithélium ou d'un embryon, cycle cellulaire) ou en pré-

sence de stress (mécaniques, osmotiques, biochimiques). À l'échelle multicellulaire on ne sait pas ce qui régule la taille d'une tumeur en croissance, d'une colonie bactérienne dans un environnement confiné ou comment les flux des fluides interstitiels traversant les interfaces confinantes influencent cette régulation. On cherche à comprendre comment le cerveau ou d'autres organes modulent la dimensionnalité de ses espaces extracellulaires pour contrôler l'(a) normalité de ces flux (nutriments, drogues).

TRAITEMENT DE L'INFORMATION

L'information est multiple dans les systèmes vivants, elle peut être de nature mécanique, chimique, électromagnétique, thermique ; son traitement est un processus complexe et fondamental. Au-delà des phénomènes classiques de **perception sensorielle**, les phénomènes de **taxie** (chimiotaxie, phototaxie, haptotaxie...) ainsi que la **transcription**, la **réponse immunologique** peuvent être compris en termes de **processus d'information**. Dans cette optique, les objets biologiques sont des systèmes avec de nombreux degrés de liberté, soumis à certaines contraintes physiques et façonnées par l'évolution pour : **collecter** des données (lumière, molécule, ADN...), les **élaborer** (l'information passe par un canal, e.g. neurone, réseau biochimique, machinerie de transcription...) et prendre finalement une **décision** (activer un neurone, bouger dans une certaine direction, transcrire correctement un gène...) fondée sur des signaux incomplets ou bruités. La physique du vivant a donc certainement un rôle important à jouer dans la mesure des grandeurs associées à l'information, à sa production et à sa transmission ainsi que sur les mécanismes de mémoire et d'adaptation.

INFORMATION GÉNÉTIQUE ET ÉPIGÉNÉTIQUE

Un important verrou scientifique est dû au couplage intrinsèque **entre la matière** qui représente l'information sous sa forme physique **et son fonctionnement** même au niveau biochimique et biophysique. Un acide nucléique peut représenter à la fois un code/séquence comme une molécule avec un caractère enzymatique ou un substrat spécifique pour déterminer des mécanismes globaux de la cellule (e.g. division, croissance, mort) ou encore un élément non codant (dont on ne connaît pas la fonction, mais qui constitue la large majorité d'ADN nucléaire des cellules eucaryotes). De même, l'épigénétique montre que l'information génétique n'est pas exclusivement stockée sous forme de séquences de nucléotides innées, mais résulte aussi des interactions collectives entre molécules et substrats. Dans ce contexte, **les cellules se différencient** en fonction non seulement de leur code génétique, mais aussi de l'interaction prolongée avec l'environnement via une signalisation moléculaire intra-, inter- et extracellulaire fluctuante, une temporalité, auxquels s'ajoute le bruit intrinsèque lié à l'expression génique. Ces décisions stochastiques génèrent une diversité cellulaire, qui est essentielle au développement des organismes, à l'utilisation optimale des ressources microbiennes ou à la survie dans un environnement fluctuant. Les mécanismes

qui sous-tendent les **décisions** des différents types de cellules restent méconnus et rejoignent des problématiques de l'évolution des organismes et de leurs études théoriques. La physique des milieux complexes et multiphasés, couplée à l'analyse des données génomiques, mais aussi d'**évolution dirigée**, devraient conduire à des analyses quantitatives de ces principes, et à en explorer l'impact sur le développement des organismes.

MÉCANOTRANSDUCTION

La mécanobiologie a quelque peu révolutionné les sciences du vivant depuis une quinzaine d'années, de l'étude du développement embryonnaire à la lutte contre le cancer en passant par l'ingénierie tissulaire. Ce domaine étudie comment les cellules réagissent aux forces mécaniques qui s'exercent sur elles. Un certain nombre de récepteurs sensibles aux contraintes mécaniques, de cascades (ou voies) de mécanotransduction, reflétant les réseaux de couplages complexes entre la mécanique, la biochimie et l'expression génétique sont aujourd'hui identifiés. La déformation mécanique du noyau a certainement un effet direct sur cette régulation génétique. Les défis pour la physique du vivant sont de mesurer les **propriétés mécaniques et chimiques** des cellules et tissus en réponse à des modifications génétiques contrôlées et vice versa ainsi que de proposer des **mécanismes mésoscopiques et multi-échelles** de la mécanotransduction. Les approches expérimentales allieront des expériences avec perturbations contrôlées (pincés optiques, magnétiques, ablation, optogénétiques, microfluidique), avec un contrôle génétique, une imagerie utilisant des sondes ou biomarqueurs moléculaires de forces mécaniques et du métabolisme. Cette approche perturbative sur des aspects mécaniques, physiques, biochimiques et génétiques demandera aux physiennes et physiciens d'être toujours plus en concertation avec les biologistes et les chimistes, de réaliser les analyses biologiques ou physiques sur les mêmes bio-échantillons, de rendre les protocoles robustes et transférables d'une communauté à l'autre. Etant donné que de nombreuses pathologies sont associées à des dérégulations de ces voies de signalisation, des dispositifs de tri, de diagnostic ou de criblage pourront certainement émerger de ses recherches.

MÉCANOTRANSDUCTION DANS LES PLANTES

Au cours de la morphogenèse des plantes, les contraintes mécaniques jouent un rôle important à toutes les échelles du développement de la plante, du noyau, de la cellule, mais aussi de l'ensemble du réseau de la sève et de l'organisation structurale globale des arbres (effets du vent et de la gravité). Différents résultats ont pu être obtenus sur les effets mécaniques de surpression hydrodynamique (turgescence) et de stress osmotique. Cependant, les **mécanismes moléculaires** correspondants restent inconnus. Sur de nombreux tissus, des techniques AFM ont été utilisées pour mesurer ou induire des contraintes mécaniques. Cela demande de développer des **mo-**

dèles mécaniques mêlant propriétés des parois et effet de la pression de turgescence. Les effets particuliers aux plantes tels que la sensation de la gravité ont été explorés. Le passage à des techniques optogénétiques est moins simple que pour des cellules animales du fait de l'effet de la lumière sur les plantes dans leur fonctionnement normal, sans parler des complications des techniques optiques du fait de leur faible transparence. Transposer ces techniques aux plantes sera un défi intéressant. À l'inverse, transposer les avancées faites pour des systèmes « plantes » vers les systèmes « animaux » sera un objectif pour les années futures, comme celui de s'intéresser à la poro-élasticité. La communication intra-plantes et inter-plantes via des signaux biochimiques et hydrauliques reste à comprendre en profondeur.

INFORMATION DANS LE CERVEAU

La recherche des principes physiques qui sous-tendent la représentation et la transmission de l'information dans le cerveau a conduit à la découverte des canaux ioniques et à la description mathématique la plus aboutie des interactions entre cellules. L'exploration du flux d'informations a également conduit à des méthodes expérimentales remarquables pour surveiller l'activité électrique des neurones, et à un large éventail d'idées théoriques sur la manière dont l'information est représentée. Ces développements mettent en évidence le fossé entre la vision réductionniste qui s'arrête aux molécules et la vision fonctionnelle qui s'arrête aux descriptions abstraites des codes neuronaux et de la dynamique des réseaux. Grâce au développement de techniques fondées sur le contrôle des fronts d'onde permettant le **contrôle neural par optogénétique 3D**, la mesure de l'activité simultanée d'un grand nombre de neurones est sur le point d'affiner considérablement les modèles théoriques, tant pour la **représentation de l'information** que pour le **comportement collectif dans les réseaux neuronaux**. Un effort doit être fait pour pousser ces théories dans un régime qui inclut la dynamique complète de neurones, et relier les modèles abstraits de codage à la dynamique connue des canaux ioniques. Les théories du comportement collectif prédisent l'émergence de corrélations mesurables. Se pose alors la question des états collectifs minimaux (les plus simples) compatibles avec les corrélations mesurées qui permettent d'assurer les mêmes fonctions cérébrales. À l'échelle moléculaire, des questions restent ouvertes sur la **physique du transport des ions à travers les canaux** et leur impact sur le potentiel d'action, e.g. pourquoi et comment les cellules choisissent-elles les canaux ioniques à insérer dans une membrane parmi la centaine encodée par le génome ? Quelle organisation des canaux et quel coût énergétique permettent de transmettre une information robuste ? Quelle est l'efficacité du système ? Ce dernier exemple met en évidence la relation entre traitement de l'information et consommation de l'énergie par les cellules. Il faudra à l'avenir aller vers une description plus globale de ces notions, fondée sur la physique statistique hors-équilibre.

RÉSEAUX MATHÉMATIQUES ET APPROCHES OMIQUES

La notion de réseau s'utilise aussi pour décrire, mathématiquement et de manière intégrative, l'information et l'organisation complexe des interactions entre éléments moléculaires fondamentaux de la cellule (facteurs de transcription, protéines, métabolites, éléments du cycle circadien...). Elle fait appel à l'utilisation des données à haut débit dans les approches omiques ou aux réseaux d'interactions à l'échelle des populations d'organismes et d'écosystèmes. Ces approches de la biologie des systèmes et des systèmes écologiques voient une participation active des physiciennes et des physiciens dans l'effort encore inachevé pour fournir une description spatiale de ces réseaux et caractériser/inférer les échelles et les propriétés, physiologiques ou pathologiques, des cellules, tissus, organes et populations d'organismes.

ÉVOLUTION ET ADAPTATION

Si les sciences de l'évolution ont reçu une contribution théorique importante de la part des sciences physiques, il manque encore une connaissance quantitative des lois de l'évolution des systèmes vivants. Par évolution, on considère ici tous les processus de mutation, sélection et d'adaptation d'une population d'organismes à différentes échelles temporelles : de quelques heures pour l'évolution des spécificités d'une population bactérienne face à une pression environnementale (changement des conditions physico-chimiques, action de prédation...), à quelques mois ou années pour l'évolution d'une population cellulaire vers un état métastatique et cancéreux, ou à quelques millions d'années pour l'évolution d'une espèce et aux croisements entre espèces sur des périodes beaucoup plus longues. Les processus de réponse immunitaire entrent aussi dans ce contexte. En l'état actuel, **aucun modèle physique théorique ne prédit les événements rares de mutation et de sélection des gènes, leur temps et leur probabilité d'apparition.** Si les processus d'évolution se produisent dans un paysage multi-paramétrique, ils dépendent aussi de l'histoire parcourue par les organismes, et ne sont pas nécessairement soumis à des contraintes de ressources finies ou des conditions physico-chimiques de leurs environnements, demandant une quelconque optimisation. L'analyse massive des génomes et les expériences conduites sur des systèmes modèles à croissance rapide (bactéries, levures), couplées à des modèles statistiques de génomique des populations *in vitro* et *in vivo*, pourront probablement rendre compte d'approches quantitativement pertinentes d'ici une dizaine d'années. De même, Il est de grand intérêt de comprendre comment des organismes s'adaptent et survivent, modifiant leur génome, dans des **conditions physico-chimiques extrêmes** de pression, de pH, de température et même de vide (e.g. tardigrades).

Chez les plantes, savoir comment les différentes fonctions ont été optimisées est une question clé, tout comme **observer les écosystèmes** au cours de l'évo-

lution. De même, la question de leur adaptation à des variations environnementales parfois extrêmes (effet du vent, réchauffement climatique, sécheresse) reste ouverte. Pour le problème important de la résistance à la sécheresse, la question principale est comment le réseau hydraulique fonctionnant sous pression négative résiste, s'adapte, réagit aux dommages subis. Les problématiques d'évolution pour les plantes sont forcément globales et concernent la compréhension de l'interaction entre de nombreux organismes au niveau de tout leur écosystème (bactéries, champignons) avec des relations de pathogénicité ou de symbiose fructueuse.

BIO-INSPIRATION ET BIO-MIMÉTISME

La thématique du biomimétisme est très interdisciplinaire au niveau scientifique et très transversale de par ses enjeux sociétaux. Le biomimétisme s'inspire de la nature, des plantes, des animaux et des écosystèmes dans le but d'atteindre différents objectifs : isoler et mimer les mécanismes fondamentaux du vivant afin d'améliorer notre santé, optimiser nos mobilités, nos réseaux et nos communications, préserver nos ressources et nos écosystèmes, développer de nouveaux matériaux, de nouveaux médicaments. Une deuxième classe d'approches du biomimétisme concerne son utilisation pour une meilleure compréhension des mécanismes biologiques fondamentaux (contrôle des paramètres du système et de son environnement).

BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE

Les cellules synthétiques permettent de mimer des fonctions essentielles des cellules ou de produire des médicaments, des bio-carburants (*bottom-up approach*). Ces cellules synthétiques sont constituées d'une bicouche lipidique ou d'une micro-émulsion emprisonnant des éléments essentiels comme l'ADN, des ARN, des sources d'énergie, des protéines et enzymes essentielles pour faire polymériser un cytosquelette et exercer les diverses fonctions envisagées.

SPHÉROÏDES, ORGANOÏDES

Ils sont fabriqués à partir respectivement d'une collection ou d'une (ou quelques) cellules, différenciées ou non. Lorsque celles-ci sont prélevées sur un patient, ces agrégats récapitulent autant que possible les caractéristiques du tissu ou de l'organe du patient. Ils sont donc le matériau idéal pour **tester de façon personnalisée une thérapie** (physique, chimique, génétique...) et pour **limiter l'expérimentation animale**. Leur conception demandera encore certainement un long dialogue entre spécialistes de médecine, biologie, mathématiques, ingénierie notamment pour bien prendre en compte le micro-environnement (contraintes et déformations mécaniques, consommation, sécrétion, dégradation et diffusion des facteurs solubles) et son couplage avec l'expression génétique, la différenciation.

MATÉRIAUX BIOSOURCÉS

Ils sont envisagés pour remplacer les énergies fossiles, pour la **chimie verte** ou comme source de matériaux (construction, isolation...). Ils peuvent aussi remplacer des processus énergivores et polluants par des solutions dans le domaine des **matériaux et surfaces dits «smarts»** (fonctionnels ou intelligents). On peut par exemple utiliser des structures végétales pour obtenir des fonctions n'existant pas dans la nature, comme la réfraction acoustique négative. De par leur nature multi-échelle et optimisée, leur sensibilité aux agents extérieurs et leur biocompatibilité, les matériaux biosourcés permettront de concevoir des **capteurs** pour la médecine personnalisée ou pour la robotique molle. Les physiennes et physiciens devront dialoguer avec les biochimistes ou biologistes des plantes pour exploiter ou fabriquer de **nouvelles structures par manipulations génétiques**.

LES MATÉRIAUX À ADN OU ARN

Les matériaux à ADN ou ARN ou s'en inspirant, tels que les **origamis d'ADN**, permettront de construire des nanostructures pour des applications médicales ou pour le stockage à haute densité de l'information. Le biomimétisme à l'échelle moléculaire peut conduire au développement de matériaux à mémoire, de protéines synthétiques. Des **protéines artificielles** créées par évolution dirigée pourront aider à la constitution de ces matériaux, de médicaments ou à celle de biocapteurs, de biomarqueurs. Les approches hybrides d'intelligence artificielle combinées à des modèles physiques contribueront progressivement à la conception de ces nouveaux matériaux bio-sourcés, ou issus de la bio-inspiration moléculaire.

BIOMIMÉTISME COMPORTEMENTAL

Le biomimétisme du déplacement animal s'intéresse à des questions fondamentales d'optimisation de l'aérodynamique (oiseaux, insectes) ou de l'hydrodynamique (organismes aquatiques) en vue d'applications vers nos moyens de mobilités à diverses échelles (drones, robots, véhicules). L'observation et la modélisation des **mouvements collectifs de populations animales** (troupeaux, bancs, nuées) ou **cellulaires** (eucaryotes, bactéries, algues, protistes) permettent, par des modèles, d'extraire des informations sur les modes de communication entre ces agents. Elles constituent une source d'inspiration importante pour piloter des assemblées de robots et pour gérer des réseaux de communication ou de mobilités. Les **mécanismes de production de mouvement sans muscle** chez les plantes fondés sur des systèmes d'actuation simples suscitent un intérêt croissant dans le domaine de la **robotique molle**. De nouvelles questions émergent quant aux modes de communication (chimique, électrique, hydraulique...) pour la régulation des actuations. Cet aspect biomimétique concerne aussi la production d'écoulements.

INSTRUMENTATION ET DÉFIS TECHNOLOGIQUES

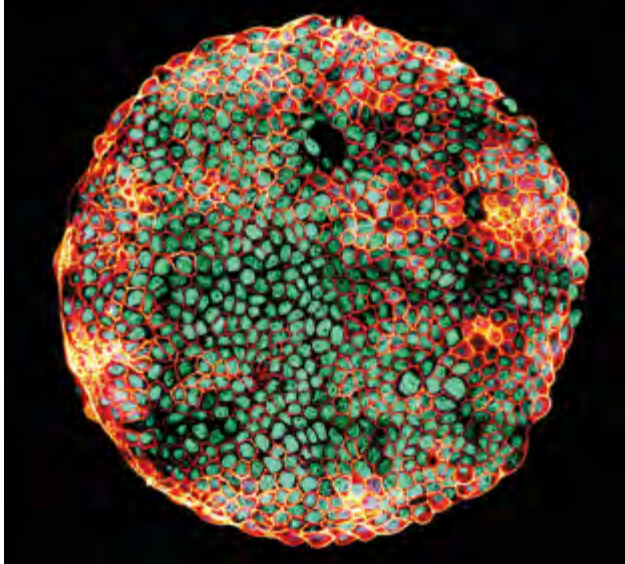
L'étude des systèmes vivants est à l'origine du développement d'outils et de technologies toujours plus complexes s'appuyant sur des interactions avec d'autres domaines de la physique, mais aussi, informatique et mathématiques, chimie et ingénierie. Les besoins concernent des outils d'imagerie et de spectroscopie, des capteurs et microsystèmes pour des mesures physiques dans leur contexte naturel (physiologique et pathologique), la récolte et le traitement des données.

LES MÉTHODES D'IMAGERIE

La physique a depuis longtemps développé des outils d'imagerie pour les sciences biologiques. Les efforts dans les prochaines années porteront sur la **microscopie multi-échelle** (e.g. imager tout un cerveau tout en gardant la super-résolution), en **3D et dans des milieux absorbants et diffusants**. Ils conduiront à établir une anatomie quantitative des tissus et à la génération d'une énorme quantité d'images 3D qu'il faudra traiter pour en extraire l'information intéressante, puis annoter, partager dans les banques de données. Les microscopies de super résolution ont connu un fort développement et auront certainement un grand avenir en particulier en infrarouge (IR) ce qui nécessitera le développement de nouveaux marqueurs dans l'IR (e.g. nanotubes de carbone), des nouveaux lasers à 1,3 μm et 1,7 μm . De même l'**imagerie 4D** permettant d'imager la dynamique cellulaire *in vivo*, et limitée par la quantité, la visualisation et la représentation des données générées, se dirige vers une imagerie plus intelligente s'appuyant sur des méthodes d'IA et d'inférence. Pour les neurosciences, les technologies devront être de moins en moins invasives pour s'adapter à des organismes non seulement vivants, mais en déplacement (*freely moving animals*) ce qui nécessitera le développement de nouveaux marqueurs et de microscopes avec optique miniaturisée et fibres optiques, une communication sans fil embarquée. Un autre effort sera porté vers les **technologies sans marquage et non perturbatives**. L'imagerie acoustique, photo-acoustique (imagerie de Brillouin), de phase, à contraste non-linéaire (SHG et THG), Raman cohérente, la tomographie en cohérence optique (OCT) ou encore la mesure de l'autofluorescence activée par impulsion laser femtoseconde ne devraient pas arrêter leurs progrès. Ces techniques sont particulièrement importantes pour l'étude des organismes pour lesquels le marquage est difficile et permettent de s'affranchir du risque d'artefacts liés au marquage.

FAISCEAU SYNCHROTRON

Historiquement utilisé en biophysique pour mesurer la structure des macromolécules (protéines), celui-ci se développe vers l'**imagerie pour l'étude du vivant**. Les évolutions techniques à venir suite aux mises à niveau (qualité du faisceau, taille du faisceau, intensité, cohérence, détecteurs), en particulier du synchrotron SOLEIL,



© Nicolas HARMAND, David PEREIRA,
Sylvie HÉNON, Laboratoire Matière et
Systèmes complexes (CNRS / Université
Paris Cité), 2017

les modalités d'imagerie avancée, permettant l'imagerie en temps réel d'événements biologiques dynamiques à l'échelle microscopique.

LES DONNÉES

Nous assistons à une phase de **collecte de données d'une ampleur sans précédent**. Au-delà de l'appropriation et de l'amélioration des outils de l'IA, l'un des défis pour la communauté de la physique est de pouvoir intégrer des équipes interdisciplinaires faisant le lien entre les connaissances biologiques et l'analyse mathématique ou la modélisation à l'aide de concepts, d'interprétations et d'outils physiques. Du côté des biologistes, cela faciliterait l'interprétation des données, du côté des mathématiciens, cela accélérerait et faciliterait la modélisation, car les lois physiques contraignent les modèles statistiques (**IA hybride**). À cela s'ajoute le développement des approches corrélatives, multi-échelles, et multimodales qui mènent vers des systèmes de données à N dimensions toujours plus grandes. La notion de **réduction de la dimensionnalité**, permettant le passage d'une description complexe des cellules à un modèle minimal avec un nombre de paramètres réduit tout en conservant l'expression de la variabilité entre cellules et de leur comportement dans l'espace et le temps, est un enjeu de physique théorique et de physique statistique et de leurs applications à la théorie des réseaux. De plus, la **réduction des données conséquentes** par des modèles physiques devient un enjeu pour la **sobriété numérique**.

APPROCHES DE PHYSIQUE COMPUTATIONNELLES

Depuis le développement des méthodes numériques et l'utilisation des grandes infrastructures de calcul, l'étude des interactions moléculaires a nécessité le développement d'**approches computationnelles quantiques**, souvent **couplées à la dynamique moléculaire classique**, pour permettre une investigation multi échelle en temps et espace. Ces méthodes devront constamment évoluer pour pallier un besoin croissant de calcul, souvent lié aux approches d'IA, et pour répondre aux besoins de **modélisation de molécules synthétiques d'intérêt thérapeutique** (conception d'anticorps, antigènes, médicaments...) dans un contexte de **médecine de précision et personnalisée**. Elles profiteront des connaissances et des bases de données issues de la biochimie structurale, de la cryo-tomographie, des microscopies et spectroscopies super résolues.

représentent une opportunité pour la France d'être pionnière dans ce domaine. Ils permettront des études multimodales et corrélatives, multi-échelles, avec une gamme de longueurs d'onde élargie de l'infrarouge aux rayons X durs, des temps de mesure de la micro-seconde à quelques heures, une résolution nanométrique, des mesures en conditions et environnements réels et extrêmes. Les nouvelles opportunités d'étude sont vastes, et de manière non exhaustive, il sera possible d'obtenir des **informations moléculaires résolues en temps et espace dans des cellules ou tissus, sur des organismes, hydratés, fixés ou cryogénisés**; de corréler la structure et la chimie d'objets 3D avec une résolution de 20 nm, de suivre des cinétiques de croissance, la dynamique de l'interaction de peptides ou drogues avec des bactéries ou couches lipidiques, d'étudier les séparations de phase liquide/liquide...

LES CAPTEURS ET MICROSYSTÈMES

Les besoins en capteurs et microsystèmes sont divers. De manière non exhaustive ceux-ci concernent le **suivi du métabolisme**, en particulier énergétique, et des **mécanismes de régulation**; le développement de capteurs permettant par exemple la mesure de la conversion de l'énergie à l'échelle moléculaire (e.g. ATP vs travail, gradient protonique vs ATP) ou la mesure des flux d'oxygène dans le cerveau, et l'intégration de ces capteurs à plusieurs échelles pour des mesures corrélatives. L'essor fulgurant de la **microfluidique** ces 20 dernières années a permis de nettes avancées dans la caractérisation des systèmes vivants en fournissant des environnements sous écoulement contrôlé, permettant l'utilisation de faibles volumes ou quantités de matière biologique, le multiplexage des expériences, la réalisation de gradients chimiques ou encore d'imposer des contraintes mécaniques. Les avancées attendues de la microfluidique sont nombreuses. Les futurs systèmes offriront des environnements de plus en plus physiologiques. Ils pourront être modulaires pour la fabrication de systèmes plus complexes (**organ-on-a-chip**) ou faciliter le multiplexage, ils pourront intégrer des capteurs ou systèmes de mesure (MEMS, capteur de forces, mesures électriques) et traiter des flux plus réduits pour l'analyse en molécule unique (**nanopore** et **nanofluidique**). Des efforts seront également dévolus à l'amélioration de la compatibilité et de la synergie entre les dispositifs microfluidiques et

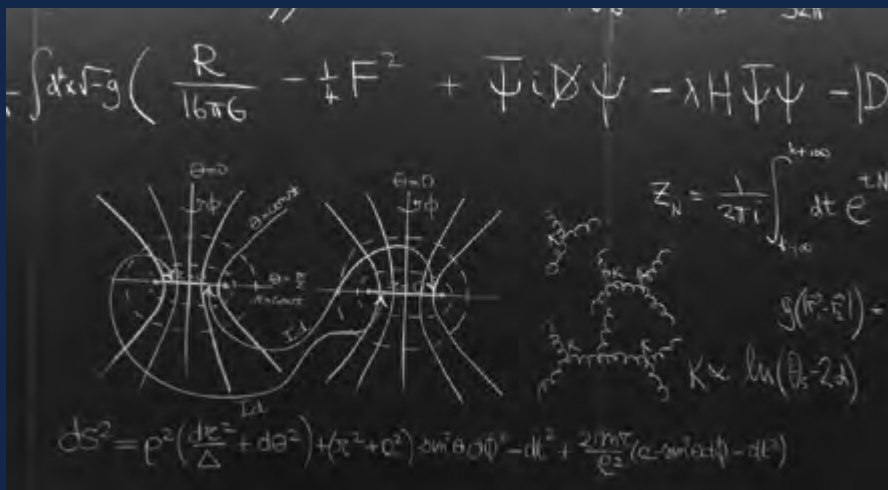


Tableau noir.

© Institut PÉRIMÈTRE de physique théorique, 2016

Lois fondamentales

RÉSUMÉ

L'énoncé et l'étude des lois et des interactions fondamentales de la physique s'étendent sur un très vaste spectre : du rayon de Hubble, $r_H = 10^{26}$ m, à l'échelle de Planck, $l_p = 10^{-35}$ m. Ce spectre couvre intimement la physique des particules élémentaires et des astroparticules, la cosmologie et la gravité en passant par la physique de basse énergie comme la physique atomique et de la matière condensée.

Au-delà de l'interprétation d'observations à travers des principes fondateurs qui reposent sur un fort socle mathématique, une étude théorique peut mener à un nouveau paradigme dont la vérification expérimentale, au moment de son énoncé, n'est pas encore possible. La théorie peut aussi développer des outils de calcul et d'analyse inédits pour **fournir des prédictions** de plus en plus précises d'observables expérimentales, en cours ou à venir, afin de **valider un modèle théorique**, délimiter et guider des perspectives originales, ou déceler un signe avant-coureur de **nouvelle physique**. Cette approche théorique est dans la lignée d'une longue tradition. En repensant le temps et l'espace dans un cadre mathématique novateur, il aura tout de même fallu attendre plus d'un siècle la détection des **ondes gravitationnelles** (OG). Depuis, une ère sensationnelle commence pour sonder l'Univers. Les futures analyses de

données haute précision en OG et cosmologie auront besoin d'outils mathématiques tout aussi novateurs. D'ailleurs, des développements fascinants voient le jour, empruntant de nouvelles techniques (amplitudes) et des approches (*bootstrap*) héritées des calculs de précision en physique des hautes énergies. Ainsi, la découverte récente du boson de Higgs aura requis des calculs héroïques et des simulations phénoménologiques poussées. Cet effort sera poursuivi, d'autant que les calculs théoriques ont mis en avant des structures mathématiques ouvrant un domaine en pleine expansion. On trouve une effervescence similaire dans l'extraction et l'interprétation des paramètres cosmologiques dans le cadre du **modèle Λ CDM**, avec la confirmation que trois quarts du bilan énergétique actuel de l'Univers semblent dus à une constante cosmologique de nature inconnue, un quart à une matière noire insaisissable, et seulement quelques pourcents aux ingrédients de notre physique standard. En outre, ce modèle n'explique pas l'asymétrie matière-antimatière. Il se pourrait cependant que la masse des neutrinos fournisse une explication si ces neutrinos sont du type Majorana. La **physique des neutrinos** est dans une phase foisonnante à la fois en physique des hautes énergies, en cosmologie, en astrophysique et à travers les OG. Le problème d'une **formulation quantique fondamentale de la gravité** reste un défi majeur qui questionne les principes fondateurs de la mécanique quantique, la nature de l'espace-temps et l'origine de l'énergie noire et de la matière noire. Par exemple, l'étude des corrélations dans les fluctuations de densité primordiales — qui conservent une trace de leur genèse, quand à la fois la mécanique quantique et la gravité jouaient un rôle fondamental — permettra d'élucider plusieurs mystères. Une activité intense repose sur la découverte de dualités entre certaines théories de jauge et certaines formulations de la gravitation dans des espaces courbes, avec des ramifications multiples et captivantes. Les propriétés des dualités, l'apport de l'étude des systèmes intégrables et la découverte de symétries sous-jacentes (insoupçonnées jusqu'à récemment) promettent des développements considérables. On trouve une application à la matière condensée de la dualité holographique qui relie la gravitation quantique dans un espace anti-de Sitter à une théorie des champs conforme définie sur le bord de cet espace. En effet, des métaux dits étranges (ou planckiens) pourraient avoir une intrication quantique et un lien avec la physique des trous noirs. De même, en astrophysique des particules, l'approche **synergique multi-messagers** est amenée à se développer considérablement. Cette approche vise à combiner les manifestations multiples d'un même événement à travers plusieurs observables : signaux électromagnétiques sur un large spectre incluant ceux émis par les supernovæ et kilonovæ, période des pulsars, télescopes à neutrinos, rayons cosmiques chargés notamment d'antimatière, OG, fond diffus cosmologique (CMB), cartographie des grandes structures (LSS) et autres sondes cosmologiques. Une autre synergie en mouvement

concerne l'exploitation de différents aspects de la métrologie quantique par la communauté des physiciennes et physiciens des hautes énergies.

Aux basses énergies, les avancées réalisées dans **le contrôle précis de la lumière et de la matière** ont conduit à la montée en puissance et à la diversification des mesures de précision. La convergence de nombreuses technologies et méthodologies promet de réels progrès sur une décennie dans divers domaines (métrologie des fréquences, l'interférométrie atomique, opto-mécanique...). Celles-ci couvrent le contrôle à l'échelle quantique de systèmes de complexité croissante, l'extension de la métrologie temps-fréquence ainsi que des dispositifs photoniques à des fenêtres spectrales jusque-là inaccessibles avec des puretés spectrales inégalées et des gammes de puissances étendues du photon unique au pétawatt. De nouveaux objets d'étude qui présentent une sensibilité accrue sont proposés pour sonder la **variation des constantes fondamentales**, tester les symétries fondamentales et l'électrodynamique quantique aux ordres supérieurs ou rechercher des signatures de matière noire ultralégère. L'ensemble des expériences dédiées aux mesures de précision a un potentiel de progression et de renouvellement indiscutable, tout d'abord via l'amélioration des dispositifs expérimentaux existants en termes de bruit/stabilité et biais/exactitude, mais aussi via l'exploitation des phénomènes quantiques les plus poussés tels que 1) l'intrication et la génération d'états comprimés de spins ou de la lumière pour atteindre des sensibilités au-delà de la limite quantique standard, 2) le contrôle quantique optimal, 3) les mesures combinant plusieurs sous-systèmes couplés (certains servant à sonder l'environnement ou à protéger de la décohérence). En outre, **l'hybridation entre différents capteurs** devrait permettre un gain substantiel en sensibilité et un accès à de nouvelles grandeurs d'intérêt. De même, la mise en réseau des horloges et capteurs quantiques à grande échelle promet des avancées significatives qui devraient surpasser la portée des capteurs individuels. Dans ce contexte, **l'infrastructure de recherche REFIMEVE** unique au monde est un atout pour la France. L'espace et les laboratoires souterrains sont des environnements privilégiés. En particulier, les expériences de physique quantique dans l'espace suscitent une attention croissante en raison des nombreuses possibilités qu'elles offrent pour tester les lois fondamentales de l'Univers, que ce soit avec des atomes froids, des dispositifs photoniques ou opto-mécaniques.

Lois fondamentales

PRÉAMBULE

La distribution des thématiques au sein des instituts du CNRS fait que, pour la physique des lois fondamentales, on retrouve dans CNRS Physique surtout d'une part les mesures de précision à basse énergie et d'autre part la théorie des hautes énergies et des grandes distances, la contrepartie expérimentale de celle-ci étant développée dans d'autres instituts tel que CNRS Nucléaire & Particules pour la physique des (astro) particules, et CNRS Terre & Univers pour l'astrophysique et la cosmologie. Ce texte de prospective reflète les thématiques d'intérêt plus direct pour CNRS Physique, sans pour autant manquer de souligner la nécessité de collaborations et synergies avec les autres instituts.

THÉORIE

L'énoncé et l'étude des lois et des interactions fondamentales de la physique couvrent un très vaste spectre d'échelles allant du rayon de Hubble, $r_H = 10^{26}$ m, à l'échelle de Planck, $l_P = 10^{-35}$ m. Il n'est donc pas étonnant que le sujet recouvre intimement la physique des particules élémentaires, les astroparticules, la cosmologie et la gravité en passant par la physique de basse énergie comme la physique atomique et la matière condensée. Au-delà de l'interprétation d'observations à l'aide des principes fondateurs qui reposent sur un fort socle mathématique, la modélisation théorique prend souvent une approche réductionniste, qui à partir de quelques lois et briques fondamentales (constituants de la matière et forces), explique et prédit un très grand nombre d'observables.

Une étude théorique peut mener à un nouveau paradigme dont la vérification expérimentale, au moment de son énoncé, n'est pas encore possible. La théorie peut aussi développer des outils de calculs et d'analyses inédits pour fournir des prédictions de plus en plus précises d'observables expérimentales, en cours ou à venir, afin de valider un modèle théorique, de délimiter et guider des perspectives originales, ou de déceler le signe avant-coureur d'une nouvelle physique. Cette approche théorique est dans la lignée d'une longue tradition. En repensant le temps et l'espace, dans un cadre mathématique novateur, il aura tout de même fallu attendre plus d'un siècle la détection des ondes gravitationnelles (OG). Depuis, une ère sensationnelle commence pour sonder l'Univers. Les futures analyses de données haute précision en OG et cosmologie auront besoin d'outils mathématiques tout aussi novateurs. D'ailleurs, des développe-

ments fascinants voient le jour, empruntant de nouvelles techniques (amplitudes) et des approches (*bootstrap*) héritées des calculs de précision en physique des hautes énergies.

La découverte relativement récente du boson de Higgs a contribué à la validation du concept de symétrie cachée, essentielle pour rendre compte de la masse des particules tout en intégrant le principe de symétrie de jauge. Pour révéler cette particule, prédite 50 ans plus tôt, des calculs héroïques et des simulations phénoménologiques poussées ont été requis. Cet effort sera poursuivi d'autant que les calculs théoriques ont mis en avant de nouvelles structures mathématiques, ouvrant un domaine en pleine expansion.

On trouve une effervescence similaire dans l'extraction et l'interprétation des paramètres cosmologiques dans le cadre du modèle Λ CDM, avec la confirmation que trois quarts du bilan énergétique actuel de l'Univers semblent dus à une constante cosmologique de nature inconnue, un quart à une matière noire insaisissable, et seulement quelques pourcents aux ingrédients de notre physique standard. En outre, ce modèle n'explique pas l'asymétrie matière-antimatière et ne rend donc pas compte du déficit d'antimatière. Il se pourrait cependant que la masse des neutrinos, révélée par le biais des oscillations de saveur, fournisse une explication si ces neutrinos sont du type Majorana. La physique des neutrinos est dans une phase foisonnante à la fois en physique des hautes énergies, en cosmologie, en astrophysique et à travers les OG.

Le problème d'une formulation quantique fondamentale de la gravité reste un défi majeur qui questionne les principes fondateurs de la mécanique quantique, la nature de l'espace-temps et l'origine de l'énergie noire et de la matière noire. Par exemple, l'étude des corrélations dans les fluctuations de densité primordiales — qui conservent une trace de leur genèse, quand à la fois la mécanique quantique et la gravité jouaient un rôle fondamental — permettra d'élucider plusieurs mystères.

Une activité intense repose sur la découverte de dualités entre certaines théories de jauge (supersymétriques) et certaines formulations de la gravitation dans des espaces courbes, avec des ramifications multiples et captivantes. Les propriétés des dualités, l'apport de l'étude des systèmes intégrables et la découverte de symétries sous-jacentes (insoupçonnées jusqu'à récemment) promettent

des développements considérables — par ex., avec des méthodes de calculs d'amplitudes de diffusion bien plus efficaces que l'approche diagrammatique de Feynman. On trouve une application à la matière condensée de la dualité (ou correspondance) holographique qui relie la gravitation quantique dans un espace anti-de Sitter à une théorie des champs conforme définie sur le bord de cet espace. En effet, des métaux dits étranges (ou planckiens) pourraient avoir une intrication quantique et un lien avec la physique des trous noirs.

De même, en astrophysique des particules (ou astroparticules), l'approche multi-messagers vise à combiner les manifestations multiples d'un même événement à travers plusieurs observables : signaux électromagnétiques sur un large spectre incluant ceux émis par les supernovæ et kilonovæ, période des pulsars, télescopes à neutrinos, rayons cosmiques chargés notamment d'antimatière, OG, fond diffus cosmologique (CMB), cartographie des grandes structures (LSS) et autres sondes cosmologiques... Cette approche permet, par exemple, d'analyser l'environnement des trous noirs supermassifs avec des techniques d'interférométrie nouvelles en radio ou en infrarouge, ou encore une association probable entre des neutrinos énergétiques et des observations de déchirement gravitationnel. Cette approche multi-messagers est amenée à se développer considérablement.

Au niveau international, un effort expérimental monumental est mené afin d'explorer ces domaines. On peut citer LIGO-Virgo-Kagra, EPTA, LISA, Einstein Telescope, Euclid, LiteBird, le run 3 du LHC avant sa phase haute luminosité, DUNE, KM3NeT, CTA... Leurs résultats seront livrés sur une période de 10 ans et plus. L'essor des techniques de détection continuera d'aller de pair avec le développement de nouvelles méthodes de calculs. Les aspects mathématiques devront être renforcés, à travers, par exemple, des collaborations avec CNRS Mathématiques.

Nous insistons sur le fait que les nouveaux paradigmes décrits dans ce document impliquent des synergies qui restent à développer, au niveau français d'abord. Une incitation forte à **dépasser les frontières** doit être instituée. De nombreux développements futurs ne pourront être menés correctement que grâce à des collaborations inter-instituts. Il faut aller au-delà des cloisonnements, et favoriser les projets et les structures intra- et inter-instituts. À cet égard, et dans le contexte d'une prospective à dix ans, notons que la nature même de cette thématique implique des collaborations très étroites entre CNRS Physique et des instituts tels que CNRS Nucléaire & Particules, CNRS Terre & Univers et CNRS Sciences Informatiques. Certains de ces instituts ont une tradition de travail et de stratégie ancrée sur des projets internationaux autour des grandes infrastructures. La théorie a toujours joué un rôle fondateur et précurseur dans l'établissement des priorités (nationales et internationales) aboutissant à ces structures, ainsi que dans l'exploitation de leurs données. Il est donc **fondamental** que la physique théorique,

au sein de CNRS Physique, renouvelle son ambition, et investisse à la hauteur de ces défis futurs.

INTERACTIONS FONDAMENTALES : PHYSIQUE DES PARTICULES, LE VIDE, LA MASSE, LES CALCULS ET LES MESURES DE PRÉCISION

LHC, Higgs et théories effectives. La découverte du Higgs, seule particule scalaire élémentaire connue, constitue le couronnement du modèle standard de la physique des particules qui décrit les forces fondamentales (électrofaible et forte) dans le cadre d'une théorie quantique des champs incorporant une brisure spontanée de symétrie. À ce jour, il n'existe aucune déviation entre les calculs théoriques de haute précision et les mesures expérimentales sur, par ex., les *processus rares*, reléguant l'échelle d'une nouvelle physique dans ce secteur à quelques milliers de TeV. Cependant, une nouvelle physique devrait exister, pour expliquer la matière noire ou l'origine de la masse des neutrinos... Notons qu'avec une masse de Higgs de 125 GeV il semblerait que nous vivions dans un état métastable ! De plus, une masse de Higgs si faible, comparée à la masse de Planck ou même aux échelles sondées par les instruments actuels paraît « non naturelle ». En effet, aucune symétrie du modèle standard ne protège la masse d'une particule scalaire au contraire des bosons vecteurs ou des fermions. Bien que l'on essaie, et essaiera, de trouver une telle symétrie et un modèle dynamique associé, comme ce fut le cas pour la supersymétrie, par ex., les études phénoménologiques se concentreront de plus en plus vers une approche sans parti pris exploitant la formulation et les techniques des théories effectives en tandem avec des calculs de précision accrue.

Masse et physique de la saveur. Bien que le mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible oblige à penser la masse non comme une entité intrinsèque de la particule, mais comme une propriété du vide dont la valeur moyenne est source de toute masse, il reste à élucider les textures de masse ou l'agencement des valeurs disparates des couplages de Yukawa. Même si une hiérarchie semble établie dans le secteur des quarks, la dynamique sous-jacente est à trouver. Avec trois familles, une violation de CP est possible, mais elle n'est pas suffisante pour expliquer le déficit d'antimatière requis pour la baryogénèse. Reste aussi le mystère de l'absence de violation de la symétrie CP en QCD. L'hypothétique solution postulant l'existence de l'axion, un scalaire pseudo-Goldstone, connaît un fort regain d'attention, faisant de cette particule de très faible masse et couplage une candidate pour la matière noire. Des investigations dans le secteur de la saveur des quarks devraient être poursuivies pour contraindre les textures de masse et chercher les premiers signes d'une nouvelle physique.

Les neutrinos. En parallèle, la découverte que les neutrinos ont une masse vient d'ouvrir un chapitre fascinant où une recherche tant théorique qu'expérimentale est en pleine effervescence. La masse infime des neutrinos

qu'imposent les données (cosmologiques, de faisceaux et réacteurs pour les expériences d'oscillation ou de la désintégration β) suggère que cette masse n'est (en grande partie) pas due à la brisure électrofaible, d'autant que la structure des masses et mélanges dans ce secteur semblerait tout autre que celle dans le secteur des quarks. Les neutrinos pourraient très bien être de type Majorana, associés dans un schéma «see-saw» à des neutrinos stériles restant à découvrir. Les neutrinos ont aussi une place de premier plan en astroparticules. Une violation de la symétrie CP dans ce secteur pourrait permettre d'expliquer l'asymétrie matière-antimatière (via la leptogénèse). Pour que ceci soit possible, il faudra travailler non seulement sur les modèles de neutrinos et l'implémentation des ingrédients de la leptogénèse, mais aussi sur la physique standard, notamment les calculs de flux pour les prochaines expériences. Un effort reste à faire dans le calcul des éléments de matrices nucléaires. Cela concerne en premier lieu la double désintégration β , notamment celle sans émission de neutrino, qui serait un signal sans ambiguïté de la nature Majorana des neutrinos suggérant un scénario de leptogénèse. Cela concerne aussi les futures mesures du moment électrique dipolaire (neutron, noyaux légers, molécules radioactives...). Des avancées dans les calculs de structure nucléaire et de nouvelles méthodes et algorithmes de calculs sur réseau permettant de construire une physique nucléaire *ab initio* seraient alors nécessaires.

Précision et métrologie. L'apport de la physique standard et d'une possible nouvelle physique aux processus rares relevant de la structure de la saveur dans le secteur des quarks et des leptons (moments/transitions magnétiques, dipolaires, désintégrations rares...) devra être précisément quantifié pour accompagner l'effort expérimental (expériences à basses énergies sur les facteurs de forme électromagnétiques, LHCb, BELLE-II...). Pour les mesures à très basse énergie et la spectroscopie de précision, l'apport de la métrologie sera crucial. On pense à la possibilité de champs scalaires de très faibles masses et couplages, au-delà du set-up des axions, qui constitueraient une cinquième force, et à l'extraction des constantes fondamentales en présence de nouvelle physique émanant de très légères masses.

Calculs de précision. La découverte d'une nouvelle physique requiert des calculs de haute précision. En effet, les prédictions théoriques sont basées en grande partie sur des développements perturbatifs en théorie des champs. Ils sont essentiels pour déterminer les corrections à des ordres sous-dominants et sonder les effets indirects des particules virtuelles. Ils le seront encore plus pour sonder, par ex., les propriétés du Higgs. Les prédictions théoriques incluent aussi des éléments non perturbatifs tout aussi essentiels quand il s'agit de prendre en compte les hadrons. C'est le cas du calcul du moment magnétique du muon au-delà de l'ordre dominant, de la physique de la saveur, et également de la physique au LHC si ce n'est pour tenir compte de la structure des protons et de leur contenu en quarks et gluons (PDF-Parton Density

Functions), de l'hadronisation et même les phénomènes de resommation. Le développement de techniques de sous-structure des jets en physique des hautes énergies connaîtra des progrès remarquables, surtout après la validation des approches de l'apprentissage profond.

Précision: aspects perturbatifs et approche amplitude. L'identification de nouvelles structures mathématiques a permis de dépasser les difficultés calculatoires de l'approche traditionnelle basée sur les diagrammes de Feynman dès lors que l'ordre de perturbation (le nombre de boucles ou de pattes externes) est grand. Grâce à ces structures mathématiques, des formalismes élégants et efficaces ont pu être développés. De nouvelles symétries et des relations de récursions ont été dévoilées permettant de construire des boucles à partir d'amplitudes à l'arbre. Par ailleurs, une systématisation des fonctions analytiques représentant les intégrales de Feynman et leur itération a récemment donné lieu au concept de symboles qui encodent les fonctions transcendantales via l'alphabet (collections de fonctions mathématiques composées de logarithmes, les polylogarithmes, les valeurs zêta multiples, les courbes elliptiques, et peut-être plus à venir). Cette activité (amplitudes), qui se nourrit de plusieurs aspects de la physique mathématique et qui nourrit à son tour les domaines de la cosmologie et des ondes gravitationnelles, est en pleine expansion. L'application de ces idées au calcul de boucles dans la théorie électrofaible reste embryonnaire, des développements de fond sont à penser. La renormalisation complète de la théorie électrofaible au-delà d'une boucle n'a pas encore été achevée. Elle sera pourtant essentielle pour un futur collisionneur e^+e^- .

Précision: aspects non perturbatifs. En ce qui concerne l'aspect non perturbatif, les calculs *ab initio* sur réseau (notamment pour la QCD et la théorie quantique des champs en général) atteindront des précisions accrues et s'appliqueront à de nouvelles observables (par ex. désintégrations hadroniques inclusives). On s'attaquera à des simulations avec des mailles plus fines dans des volumes plus grands, ce qui est loin d'être évident avec les algorithmes actuels. Par ailleurs, il est vivement encouragé d'accroître l'effort mis sur l'étude des observables de la physique hadronique sur le cône de lumière. Un axe important est la détermination des PDF, cruciale pour le LHC, mais aussi pour les expériences futures de neutrinos énergétiques (LBNF/DUNE ou HyperK). En plus de la structure longitudinale, une tomographie tridimensionnelle de la structure en quarks du proton et plus généralement une tomographie partonique en position, impulsion et spin des hadrons devront être réalisées. Avec des faisceaux de noyaux, on pourra isoler les collisions dites «diffractives», qui devraient mettre en évidence le phénomène de saturation qui se produit lorsque le nombre d'occupation des états quantiques est grand. L'équation d'état de la matière nucléaire est indispensable pour la modélisation des étoiles à neutrons (EN), et les propriétés de noyaux très instables, dits exotiques, sont essentielles pour comprendre la synthèse des éléments lourds dans

l'Univers au sein des supernovæ. Ces études sont en plein essor. D'une part, la détection des OG émises lors de la fusion des EN donne des contraintes nouvelles sur l'équation d'état. D'autre part, de nouveaux accélérateurs délivrant des faisceaux d'ions radioactifs voient le jour à travers le monde et transformeront notre connaissance des noyaux exotiques. De nouvelles idées pour la QCD sur réseau sont nécessaires pour étudier ces systèmes à grande densité à cause du problème de signe lié aux fermions à densité non-nulle, les méthodes holographiques (formulées directement en signature Lorentzienne) pourraient venir à la rescousse. Les théories chirales, tel le secteur électrofaible, ne peuvent pour le moment pas être mises en œuvre pour une étude non perturbative. Cependant une théorie des champs sur réseau peut en principe être utilisée pour étudier des théories de jauge avec un contenu en matière qui les rendraient conformes à basse énergie. De telles théories pourraient apporter une explication plus fondamentale au mécanisme de Higgs (ce dernier serait alors un pseudo-dilaton ou un pseudo boson de Goldstone composite). L'étude de ces théories permet également des comparaisons avec l'approche du «conformal bootstrap».

Codes de simulations. Les codes de simulation Monte Carlo pour la physique aux collisionneurs resteront un outil crucial. Un long chemin est encore à parcourir afin de pouvoir simuler de façon systématique les processus pertinents pour le LHC et les collisionneurs futurs (les mesures des couplages du Higgs, l'exploitation de distributions à grand p_T dans plusieurs processus...). Par exemple, les calculs à l'ordre sous-dominant en QCD ne peuvent toujours pas être combinés de façon systématique avec les algorithmes de cascades partoniques nécessaires à la description de l'environnement d'un collisionneur hadronique, et de nombreux processus importants restent trop compliqués pour les performances des ordinateurs actuels. L'automatisation des calculs aux ordres sous-dominants élevés pourrait ainsi voir le jour dans les prochaines années. Une inclusion systématique des corrections sous-dominantes électrofaibles combinées aux cascades partoniques reste à faire. Ce sera crucial au vu de la précision des futures données.

MATIÈRE NOIRE

La matière ordinaire qui nous constitue représente une toute petite partie de la composition énergétique de l'Univers. Une recherche intense tant théorique qu'expérimentale continuera d'être menée pour comprendre la nature de la matière noire (MN) et la meilleure façon de la détecter. Ses propriétés restent inconnues au-delà de ses effets gravitationnels. Son spectre de masse, immense, s'étend de 10^{-22} eV à 10^{70} eV. La possibilité de plusieurs composantes de MN n'est pas exclue.

Matière noire ultra-légère. Pour des masses inférieures à l'eV, on entre dans le domaine de la matière noire ondulatoire. Pour des scénarios impliquant l'axion de la QCD ou des particules similaires (ALPs), les techniques de

mesure quantique (métrologie) constituent un «lampion» sous lequel une recherche innovante est à peine amorcée, et nécessitera un support théorique. Notons que certaines techniques développées pour traquer ce type de MN peuvent être appliquées aux ondes gravitationnelles de haute fréquence (au-delà du kHz).

Du keV au 100 TeV : le domaine de la MN en tant que particule. Des calculs plus précis et des idées sur l'exploitation de la détection directe et/ou des détections indirectes devraient être menés. Ceci concerne les particules de MN avec des masses et couplages à l'échelle électrofaible (WIMP) et celles avec des couplages encore plus faibles (FIMP). Ces dernières n'entreraient pas en équilibre thermique avec les particules connues, mais pourraient être produites avec la bonne densité relique grâce à un mécanisme de gel, même si de tels scénarios restent sensibles aux conditions initiales de l'univers primordial.

Dans la gamme de masse du keV au MeV, la possibilité de sonder cette matière noire grâce à la diffusion non seulement par des noyaux, mais aussi par des électrons doit être poursuivie. Ici plusieurs idées foisonnent, faisant appel à des techniques basées sur la rupture de liaisons chimiques, production de centres de couleurs (défauts) dans les cristaux, électrons libres dans des métaux supraconducteurs, des cristaux diélectriques... De nouvelles idées pourraient émerger d'échanges entre astroparticules et matière condensée, combinant du côté théorique l'approche DFT (pour la fonctionnelle de densité) et les techniques des théories effectives (EFT) en physique des particules. Le lien entre MN et recherches aux collisionneurs, notamment le LHC, devrait être poursuivi : certains modèles de MN prévoient aussi des particules avec des durées de vie macroscopiques, donnant lieu à des vertex déplacés et des «traces évanescences» (*disappearing tracks*).

Matière noire hyper-lourde. Au-delà du PeV on entre dans le domaine des objets compacts lourds (tels que les trous noirs primordiaux) pour lesquels des contraintes ou des découvertes pourraient émaner de la cosmologie et des données astrophysiques (rayons X, microlentillage, neutrinos).

La masse et les diverses propriétés de la MN devront être testées par les mesures de précision en cosmologie (grâce au CMB et aux catalogues de grandes structures), les données des OG et les observations multi-messagers en physique des astroparticules. À titre d'exemple, les EN, grâce à leur forte gravité, pourraient accréter des particules de MN (axions...). Cette MN pourrait aussi être produite lors de fusion de tels objets. La MN bosonique ultra-légère pourrait former des objets compacts imitant de véritables EN et des trous noirs, avec un impact sur les OG. Les interactions des neutrinos avec une MN bosonique ultra-légère peuvent produire des signaux dans le flux de neutrinos solaires, tout comme les neutrinos stériles. Encore une fois, les ajustements globaux étant complexes, le développement et l'adaptation profonde

d'outils numériques avancés sont essentiels. Ces thématiques sont un des exemples de la **synergie** que nous avons soulignée et qui appelle au décloisonnement.

ONDES GRAVITATIONNELLES, COSMOLOGIE ET ASTROPARTICULES

Ondes gravitationnelles

Les OG ouvrent une nouvelle ère de détection multi-messagers pour sonder la gravité, la cosmologie et l'astrophysique. La communauté scientifique française y est très investie. Soulignons que la détection directe des OG par LVK en 2015 n'aurait pas pu avoir lieu sans, entre autres, la modélisation des **formes d'ondes** qui, à l'origine, a été développée principalement en France. À l'horizon 2030, avec le réseau actuel de détecteurs, nous aurons réuni suffisamment de données pour déterminer, par ex., la population des trous noirs dans l'univers local (distributions de masse et de décalage vers le rouge), contraindre la constante de Hubble avec une précision inférieure au pourcent, ou encore tester la relativité générale (RG) en champ fort. Plusieurs grandes expériences (NRT, EPTA, LISA, ET, etc., ainsi que l'interférométrie atomique), qui couvriront un plus large spectre de fréquences, verront le jour. Ces expériences de plus grande sensibilité permettront de détecter des événements à des distances plus élevées, et nécessiteront une meilleure compréhension du phénomène de lentillage gravitationnel des OGs, ainsi que de nouvelles méthodes d'analyse pour traiter d'énormes quantités de données avec des signaux qui se chevauchent.

Formes d'onde. L'analyse du signal d'OG repose sur l'exploitation des formes d'ondes émises par différentes sources qu'il faut prédire avec la plus haute précision, que ce soit en RG ou dans des théories de gravité modifiées (un domaine dans lequel la France est pionnière). Une forme d'onde gravitationnelle complète doit décrire les trois phases de la coalescence d'un système binaire : la phase spiralante, la fusion et la relaxation. Pour comparer ces formes d'ondes avec les données des interféromètres gravitationnels et avoir une compréhension analytique de la physique des OGs sur un large éventail de paramètres, il faut inclure les effets de spin, de marée, la rétroaction du rayonnement gravitationnel, le flux d'OG et l'évolution séculaire du système binaire. Il est également nécessaire de dépasser l'approximation de faible excentricité. L'approche « effective à un corps », initialement développée en France, est l'une des méthodes pour déterminer les formes d'ondes des phases spiralantes et de relaxation. Il est donc nécessaire de développer (i) des résultats analytiques aux ordres les plus élevés possibles dans un développement post-newtonien (limite des petites vitesses, champs faibles) ou post-Minkowskien (champs faibles, mais à tous les ordres en vitesses), (ii) la méthode de la force propre (développement pour des binaires de petit rapport de masse), (iii) la relativité numérique et (iv) les techniques de théorie effective. Les approches analytiques post-Minkowskienne ont grandement bénéficié des méthodes de calcul des amplitudes de diffusion pro-

venant de la physique des hautes énergies et ont effectué récemment des progrès considérables.

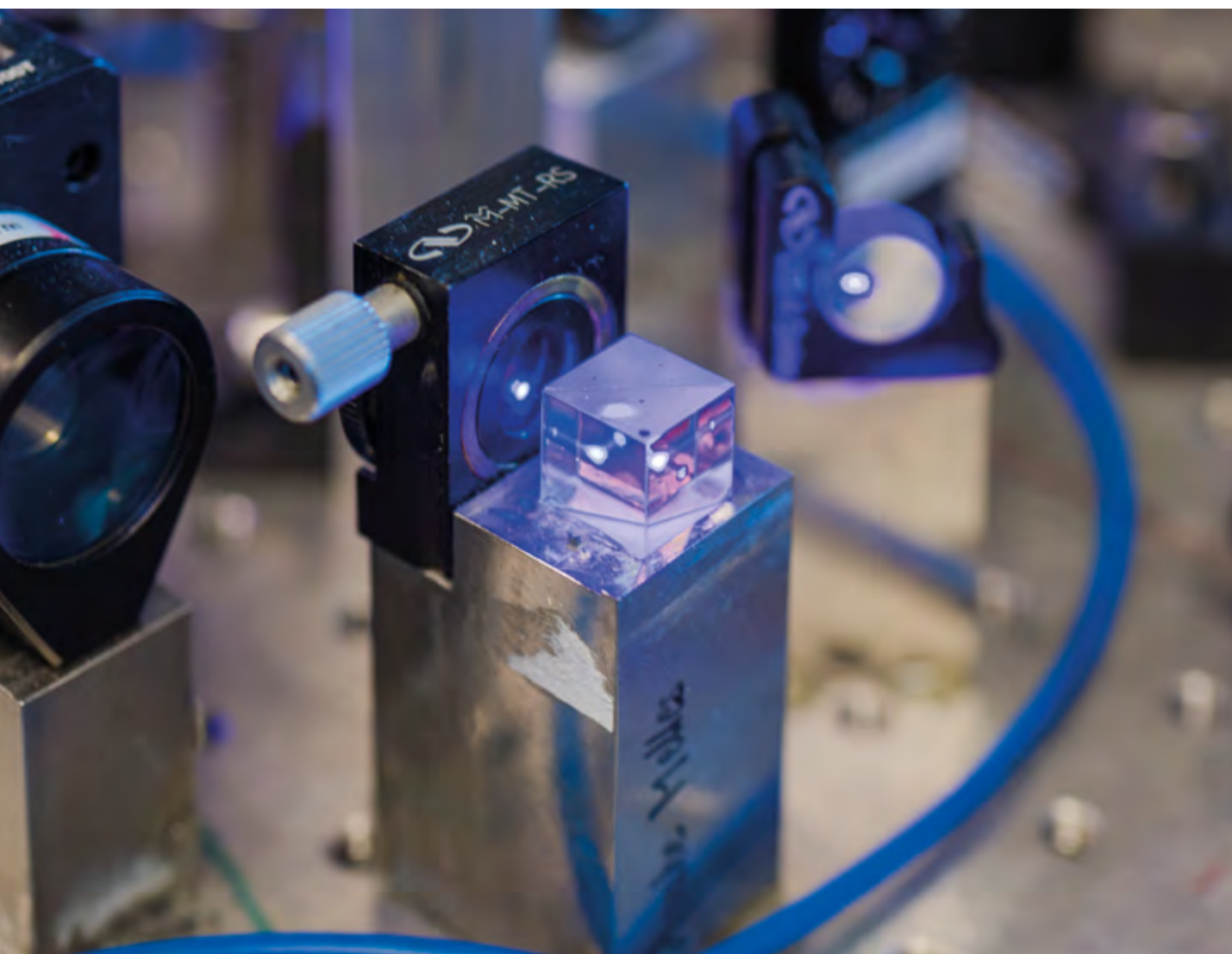
Les binaires avec des rapports de masse extrême (*extreme mass ratio inspiral*, EMRI) seront détectées en grand nombre par LISA. Obtenir leurs formes d'onde avec les méthodes de force propre jusqu'au second ordre, notamment pour les trous noirs de Kerr, est crucial. L'étude des résonances dans les EMRIs et la question de leur durabilité en présence d'un troisième corps perturbateur sont des questions ouvertes importantes. Il existe également une possibilité de dynamique chaotique dans ces systèmes.

En ce qui concerne la phase de relaxation, un calcul plus précis des modes quasi-normaux est nécessaire. Des travaux supplémentaires sur la déformabilité de marée des trous noirs en RG et les moments multipolaires induits par les effets de marée permettront également de futurs tests du « théorème de la calvitie des trous noirs » en RG. Dans le cadre des théories de gravité modifiées, il faudra adapter et étendre ces techniques, caractériser les propriétés des étoiles et des trous noirs (notamment l'existence ou non d'un horizon des événements), et évaluer l'existence d'autres objets compacts tels que les trous de ver. Pour le moment, des formes d'ondes précises n'ont été calculées que pour les théories scalaire-tenseur. Il sera, par exemple, nécessaire de prendre en compte des dégénérescences possibles avec une équation d'état inconnue pour les EN, des relations de dispersion non triviales ou un amortissement gravitationnel non standard. Des tests ultimes de l'équation d'état, utilisant par exemple la base de données COMPOSE développée en France, devront être effectués en collaboration avec, entre autres, les physicien·nes travaillant sur le plasma de quarks-gluons.

En plus des systèmes binaires qui ont été détectés jusqu'à présent, il peut exister d'autres sources ponctuelles d'OG, Ce cordes cosmiques, les étoiles à bosons, et d'autres objets exotiques dont il faudra prédire les formes d'ondes. Il est aussi essentiel d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes de production du fond diffus cosmologique d'OG au-delà de l'inflation standard, notamment pendant le réchauffement cosmologique et les transitions de phase, ou par l'intermédiaire de défauts topologiques, de pics dans le spectre primordial et de trous noirs primordiaux. Un calcul précis du spectre en fréquence associé à ces mécanismes facilitera leur détection.

Cosmologie

Une moisson de nouvelles données cosmologiques, auxquelles on associera les analyses émanant des OG, va déferler dans les prochaines années : cartographie des grandes structures, du lentillage gravitationnel, des raies d'émission spectrale, de la polarisation du fond diffus cosmologique, mesures du taux d'expansion de l'univers avec de nouvelles chandelles standards et sirènes standards ou directement par suivi temporel du décalage vers le rouge d'objets donnés, mesures plus précises de l'abondance des éléments primordiaux, observation de



Cube séparateur du banc optique d'une horloge à réseau optique au strontium. © Cyril FRESILLON / SYRTE / FIRST-TF / CNRS Images

la morphologie et de l'évolution des galaxies dans l'univers lointain et peut-être, à plus long terme, mesure des distorsions de fréquence du fond diffus cosmologique (CMB) et des anisotropies du fonds d'OG. L'investissement du côté théorique doit être à la hauteur de la précision de ces données. Cela constitue un éventail de motivations pour intensifier les recherches dans les directions suivantes :

Univers primordial. La communauté se fixe pour objectif d'importants progrès théoriques dans la compréhension de l'inflation et du réchauffement cosmologique. À un niveau phénoménologique, des questions se posent sur la génération de la non-gaussianité et des trous noirs primordiaux. À un niveau plus fondamental, il semble possible de réinterpréter les observables inflationnaires en tant que conséquence de symétries, afin de mieux comprendre l'univers primordial. Ceci inclut l'exploration et l'adaptation à la cosmologie des approches *bootstrap* et holographiques. Il serait également fructueux de mieux comprendre le problème de la complétude ultra-violette et le rôle de la physique quantique pendant l'inflation (transition quantique-classique, décohérence, confronta-

tion aux interprétations de la mécanique quantique). La communauté sera par ailleurs appelée à étudier plus en détail la cosmologie des trous noirs primordiaux (mécanismes de production, formation, évolution, accréation, agrégation, fusion). Finalement, dans le domaine de la physique du CMB, un travail théorique reste à accomplir en ce qui concerne certains effets de physique non-standard sur la polarisation (bi-réfraction) ou les distorsions de fréquence.

Cosmologie des particules. La nucléosynthèse primordiale devra être modélisée avec plus de précision, en intégrant notamment les progrès sur la mesure des taux de réaction nucléaire. Les progrès dans l'observation du CMB, des grandes structures et des abondances d'éléments primordiaux devront être répercutés sous forme de nouvelles contraintes sur la masse des neutrinos (avec une détection plausible dans la prochaine décennie) et d'autres propriétés des neutrinos (interactions, potentiel chimique, distribution non thermique, neutrinos stériles), de la matière noire et du secteur sombre.

Tests cosmologiques des théories de gravité. Le domaine

à l'interface entre cosmologie et gravitation est appelé à se développer, avec des études systématiques de l'impact des théories de gravité modifiées sur le CMB, la formation des grandes structures (aux échelles linéaires et non-linéaires) et la nucléosynthèse. Ceci implique entre autres une meilleure compréhension des mécanismes d'écrantage, ainsi qu'une recherche de cadres théoriques cohérents pour expliquer l'accélération de l'expansion cosmologique (et éventuellement le problème de la matière noire) à partir des théories de gravité.

Théorie de la formation des grandes structures aux échelles non-linéaires. La précision des futures données sur la distribution des galaxies, le cisaillement gravitationnel et les cartes de raies d'émission dans le domaine des radio-fréquences sera telle qu'une révolution au niveau de la modélisation théorique des observables est indispensable pour extraire l'information contenue dans ces données. Leur statistique complexe peut être compressée de diverses manières dont certaines restent à explorer. Ces observables sont fortement impactées par les mécanismes non-linéaires liés à l'effondrement gravitationnel, qui requièrent une modélisation avancée grâce à des techniques sophistiquées issues de la théorie quantique des champs (renormalisation, théories effectives). En parallèle, les simulations numériques sont appelées à se développer considérablement, afin de mieux prendre en compte l'effet des baryons, des neutrinos massifs, des modèles de matière noire non-minimaux tels que la matière noire tiède, en interaction ou « floue » (avec un champ scalaire ultra-léger), et enfin, des différentes théories de gravitation ou modèles d'énergie noire. Il est également nécessaire de modéliser et d'exploiter les corrélations croisées entre les cartes des grandes structures, des OGs et des rayons gamma, pour comprendre par exemple l'origine des trous noirs dans les systèmes binaires (stellaires ou primordiaux), l'histoire des trous noirs supermassifs et leur rôle dans la formation des galaxies, ou l'origine des rayons gamma.

Tests des modèles cosmologiques, origine des tensions. Les théoriciens doivent continuer à travailler à l'interface entre théorie et observation pour confronter tous les modèles intéressants (issus notamment de la cosmologie des particules et des théories de gravité) aux données futures. L'interprétation des données actuelles indique des tensions entre plusieurs types de mesures (tension de Hubble, tension du paramètre S_8 lié à l'amplitude des fluctuations aux échelles inter-galactiques, excès de fluctuations aux échelles sous-galactiques, etc.). Les tensions pourraient soit se résorber avec une meilleure modélisation des données, soit persister et impliquer l'effet de nouveaux ingrédients dans le modèle cosmologique. Dans cette optique, il faudra continuer à élargir le champ des hypothèses et à affiner les prédictions théoriques concernant notamment le secteur sombre, les théories de gravité et de possibles déviations aux grandes échelles par rapport à l'hypothèse d'homogénéité et d'isotropie du modèle de Friedmann-Lemaître, dont la mise en défaut serait révolutionnaire.

Astroparticules

L'exploration de l'approche multi-messagers requiert aussi une expertise combinée dans plusieurs domaines, allant de la physique des plasmas dans des conditions extrêmes (milieux relativistes non-collisionnels, fortement magnétisés, à grande densité de rayonnement, et parfois composés de matière et d'antimatière) à l'astrophysique des hautes énergies et à la physique des particules.

Accélérateurs cosmiques. Ce domaine en pleine expansion explore les mécanismes d'accélération mis en jeu pour porter des particules chargées (électrons, ions) à de très hautes énergies. Ces particules peuvent soit peupler le spectre du rayonnement cosmique galactique ou extragalactique, soit produire des photons et neutrinos secondaires de haute énergie par interaction avec les fonds radiatifs ou les plasmas ambiants. Les mécanismes d'accélération étudiés sont la reconnexion magnétique, l'accélération imprimée par les ondes de choc, ou l'accélération dans une turbulence. Cette physique de l'accélération est donc directement liée à certains problèmes fondamentaux de physique des plasmas. La physique sous-jacente, très riche, fait intervenir des processus non-linéaires et multi-échelles pour prendre en compte la rétroaction des particules accélérées sur les champs électromagnétiques qui pilotent l'accélération (par turbulence ou instabilité de plasma), et parfois même le rayonnement qu'elles produisent. Afin de connecter ces processus microphysiques aux phénomènes astrophysiques, il est nécessaire d'obtenir une modélisation avancée des sources sur des échelles spatiales souvent bien inférieures à celles qui sont directement accessibles à l'observation. Parmi les sources les plus étudiées, on peut citer les supernovæ, les amas d'étoiles, les objets compacts (pulsars et trous noirs) et leur environnement, les systèmes binaires, et enfin, à plus grande échelle, les galaxies actives et les jets relativistes.

Transport cosmique. Pour comprendre la propagation des rayons cosmiques ou plus généralement tout processus d'accélération de particules, il est fondamental de modéliser le transport de particules chargées dans une turbulence magnétisée, avec un processus de diffusion multi-échelle. Ce problème théorique complexe suscite un intérêt grandissant, y compris dans la communauté de cosmologie, car il est désormais reconnu que les rayons cosmiques galactiques, en se couplant à la dynamique du gaz galactique, ont une influence sur la structure et l'évolution des galaxies.

Nouvelle physique et astroparticule multi-messagers. L'analyse du spectre des différents types de rayons cosmiques offre une opportunité pour mettre en évidence l'annihilation de la matière noire (et révéler son identité). De nouvelles données à plus basse énergie (MeV-GeV) vont ouvrir une nouvelle fenêtre vers des candidats de matière noire légers. De plus, certaines propriétés des neutrinos ou de particules de matière noire lourdes ou légères (tels les axions) sont potentiellement accessibles grâce au spectre d'émission des objets compacts (so-

leil, autres étoiles, naines blanches, supernovæ, étoiles à neutrons) et à leur évolution. Ces objets ouvrent en particulier une nouvelle fenêtre pour tester la physique des neutrinos, que ce soit leurs oscillations de saveur, leur moment magnétique ou leurs éventuelles propriétés non-standard, tout en soulevant des défis théoriques passionnants pour modéliser le comportement complexe de systèmes quantiques à N -corps. D'autres tests de la matière noire sont fournis par l'analyse de la corrélation croisée entre les anisotropies de plusieurs observables multi-messagers : cartes des rayons cosmiques, des grandes structures, du CMB et des OGs. Finalement, l'observation de l'environnement des trous noirs supermassifs permet de tester les théories de gravité modifiée et la physique des plasmas en champ gravitationnel fort.

GRAVITÉ

À cause de son caractère universel, la force de gravitation s'exerce à toutes les échelles et sur tout type de matière. Comprendre comment se comporte une telle force sur un intervalle d'échelles aussi vaste est un défi majeur. Les difficultés tant techniques que conceptuelles pour asseoir la gravitation dans un cadre quantique conventionnel suggèrent que cette force pourrait être un phénomène émergent. L'extrême faiblesse de la force de gravitation par rapport aux autres forces élémentaires complique la mesure des phénomènes gravitationnels. Cependant, les futures mesures de précision en cosmologie, l'exploitation des OGs et les observations des trous noirs fourniront des informations importantes sur la physique des horizons, l'origine des conditions initiales et même la dynamique de l'énergie noire, dont les propriétés pourraient dépendre de la nature quantique de la gravitation. Par ailleurs, des mesures de précision de la gravité sur diverses échelles (GRAVITY+, EHT...) seront effectuées. Elles permettront de contraindre les extensions de la théorie d'Einstein de la gravitation.

En ce qui concerne la **gravitation quantique**, on peut suivre principalement deux approches : (1) la formulation d'une théorie quantique fondamentale de la gravitation valable à haute énergie, ou (2) une analyse des propriétés génériques de la gravitation quantique et ses manifestations à diverses échelles d'énergie. La première approche est celle suivie par de nombreuses théories (la théorie des cordes, la gravitation quantique à boucles, la triangulation dynamique causale...). Un enseignement important est la présence d'un grand nombre de solutions possibles. Il est nécessaire donc de formuler des critères fondamentaux pour exclure des familles de modèles, en utilisant par exemple des raisonnements de théorie effective, ou en adaptant des principes de causalité et d'analyticité pour contraindre les couplages et la nature des interactions. Ce domaine a connu un renouveau important grâce aux progrès conceptuels issus de la théorie des cordes. Il est également nécessaire de dériver des conséquences physiques observables de ces théories.

Les méthodes de correspondance holographique tentent de reformuler la gravitation quantique comme une théorie des champs définie sur le bord d'une région de l'espace-temps. Ainsi, des calculs perturbatifs sur le bord permettent de prédire des quantités physiques émergeant de la gravitation quantique en couplage fort, notamment grâce au développement des techniques de «bootstrap conforme».

Une question importante de la gravitation quantique est l'origine de l'entropie des trous noirs et la violation potentielle de l'unitarité lors de leur évaporation. Pour aborder ces questions, il est nécessaire de travailler dans le cadre de théories fondamentales de gravitation quantique. Le comptage des micro-états de trous noirs supersymétriques dans les modèles de théorie des cordes a, par ex., de fortes connexions avec les développements récents en théorie des nombres et le domaine de l'information quantique.

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

La physique mathématique bénéficie d'une importante synergie avec des développements récents en mathématiques fondamentales et appliquées, telles que la topologie (en utilisant la théorie des champs topologiques ou la classification des phases quantiques via les groupes de cobordisme), la géométrie algébrique et symplectique (en étudiant les variétés de Calabi-Yau et leurs généralisations avec des flux, des branes et des orientifolds), la théorie des représentations (algèbres d'opérateurs de vertex, algèbres de von Neumann, espaces de modules de carquois, etc.) et la théorie des nombres.

Amplitudes, bootstrap et holographie. Nous avons tout le long de ce chapitre soulevé l'importance grandissante de l'approche **amplitude** dans plusieurs domaines. Du côté formel, un des exemples concerne des algorithmes innovants pour résoudre les équations différentielles liées aux intégrales de Feynman, en utilisant des techniques de géométrie algébrique pour identifier les structures cohomologiques associées.

Les méthodes holographiques et les approches basées sur les systèmes intégrables sont utilisées pour évaluer des intégrales à partir des fonctions de corrélation d'une théorie conforme duale. Des avancées récentes permettent l'évaluation analytique d'intégrales de Witten, équivalentes aux intégrales de Feynman aux espaces anti-de Sitter et de Sitter, et une comparaison directe avec les calculs dans la théorie duale par des méthodes de bootstrap. Ces calculs d'amplitude dans l'espace de Sitter sont importants pour l'analyse des fonctions de corrélation cosmologique, mais cette recherche est encore à un stade préliminaire. Les méthodes de résurgence qui permettent de donner un sens aux séries divergentes des calculs perturbatifs grâce à des idées introduites initialement en France, connaissent un renouveau... sauf en France où elles sont maintenant sous-développées.

Des techniques nouvelles ont été développées pour analyser la matrice de diffusion S au-delà de l'approche en perturbation. Ces méthodes de *bootstrap*, permettent de contraindre les interactions causales en mécanique quantique relativiste en utilisant des données à basse énergie. Elles ont des applications potentielles dans des domaines tels que l'analyse des amplitudes de diffusion des pions, la gravité quantique et la recherche de manifestations de la théorie des cordes. En utilisant des contraintes de symétrie, d'unitarité et de positivité, ces techniques ont été appliquées à des systèmes en trois et en quatre dimensions.

Systèmes intégrables. Les systèmes intégrables, utilisés dans de nombreux domaines, offrent des résultats exacts. Une synergie entre les méthodes d'intégrabilité et les probabilités a mené à une description rigoureuse des propriétés d'une transition de phase. Des avancées sont attendues grâce au développement de nouvelles méthodes de résolution et à l'extension de l'intégrabilité à de nouveaux modèles. Ils permettent de comprendre des propriétés fondamentales des théories physiques et jouent un rôle clé dans l'analyse de la limite planaire des théories de jauge et la correspondance AdS/CFT. Une approche rigoureuse pour la quantification des modèles sigma intégrables est un développement important avec des applications en théorie des cordes et en matière condensée.

MATIÈRE CONDENSÉE ET PHYSIQUE DES HAUTES ÉNERGIES

Il y a toujours eu un échange très fructueux entre ces deux disciplines concernant les concepts et les techniques. Des modèles de gravité analogue, ainsi que des expériences correspondantes, étudient des phénomènes de relativité générale à partir de systèmes physiques équivalents consistant en des champs de basse énergie en matière condensée et dans les gaz quantiques ultra-froids. La théorie des catégories est utilisée à la fois en gravité quantique à boucle et dans l'étude d'ordre topologique en matière condensée. Des progrès dans ce sens sont à signaler sur la réalisation expérimentale d'anyons et leur utilisation pour le calcul quantique topologique (que ce soit dans l'effet Hall quantique fractionnaire ou dans les systèmes artificiels avec des qubits supraconducteurs).

Des phases de la matière avec un comportement non-liquide de Fermi, dépourvu de quasi-particules bien définies, et l'observation expérimentale d'une dissipation planckienne universelle dans plusieurs familles de métaux demandent un changement de paradigme. Un tel changement vient d'émerger avec une connexion surprenante entre un modèle de physique quantique désordonné, le modèle SYK, et la physique des trous noirs. Cette correspondance holographique (bord-volume) ouvre la voie à une approche moins conventionnelle pour étudier ces systèmes fortement corrélés, dont la phase métallique étrange des supraconducteurs à haute température critique constitue un exemple typique.

Les travaux sur le graphène twisté, la classification des isolants topologiques ou bien à l'interface entre matière condensée, physique des hautes énergies et information quantique mériteraient d'être poussés. En particulier, le développement de nouvelles méthodes numériques, inspirées par l'information quantique, comme l'approche de renormalisation de l'intrication multi-échelles (MERA) ou basées sur les réseaux de tenseurs, a permis d'obtenir des progrès notables dans les systèmes fortement corrélés ces dernières années et pourrait être très fructueux pour étudier les effets non-perturbatifs des théories quantiques des champs de la physique des hautes énergies.

SUPERCALCULATEURS, APPRENTISSAGE PROFOND, SIMULATIONS QUANTIQUES

Le calcul sur réseau, souvent sur des supercalculateurs dédiés, a toujours eu besoin de ressources informatiques conséquentes. L'arrivée dans le paysage international des machines exascale, d'une puissance de calcul à l'échelle EFlops, ne doit pas reléguer la France à un rang secondaire. L'approche standard (métrique euclidienne) ne permet pas d'étudier la dynamique de diffusion en temps réel, les systèmes à densité finie (plasma de quark-gluons à densité élevée, étoiles à neutrons), ou les théories de champs avec un couplage topologique... Ici, la simulation pourrait permettre de surmonter ces limitations dans une approche hamiltonienne à l'aide de réseaux de tenseurs. Les méthodes Monte-Carlo feront appel au calcul massivement parallèle et aux GPU.

De grands progrès sont nécessaires dans les simulations et l'analyse des données (pour les OG, l'astrophysique, la cosmologie, la physique des particules telle que l'étiquetage des sous-structures de jets). Les algorithmes s'adapteront à l'apprentissage profond, l'intelligence artificielle et l'informatique quantique. Pour le calcul sur réseau cela permettra de réduire les erreurs avec la prise de la limite du continu, ainsi que de permettre l'exploration de l'espace des théories des champs pour la physique au-delà du modèle standard.

MESURES DE PRÉCISION À BASSES ÉNERGIES

Les deux dernières décennies ont été marquées par une transformation profonde des expériences dédiées aux mesures de précision grâce à des avancées extraordinaires dans le contrôle de la matière et la lumière. Ces expériences exploitent désormais la sensibilité extrême des systèmes quantiques pour mesurer les propriétés fondamentales de l'espace, des particules ainsi que de leurs interactions. Elles sont en ce sens complémentaires, voire compétitives vis-à-vis des approches de la physique des hautes énergies pour la compréhension des lois qui gouvernent notre univers.

La France a été pionnière dans l'exploitation des techniques de refroidissement d'atomes pour les mesures de précision, y compris dans le cadre de missions spa-

tiales. Elle jouit d'une reconnaissance internationale dans ce domaine. Elle est à la pointe dans de nombreux domaines qui impactent les mesures de précision (opto-mécanique, photonique quantique...). L'infrastructure de recherche REFIMEVE¹ est unique au monde et constitue un atout pour la France et l'Europe.

En revanche, certaines thématiques en plein essor dans le monde et identifiées comme très prometteuses pour tester les lois fondamentales (ex. : les ions piégés, les molécules froides et les co-magnétomètres) sont trop peu représentées. Les spécificités du domaine (longue durée des projets) sont en décalage avec les programmes de financement, la durée des thèses et la volatilité des recrutements de contractuels, ce qui constitue une menace face aux efforts engagés dans d'autres pays.

MÉTHODOLOGIES ET AVANCÉES TECHNOLOGIQUES AU PROFIT DES MESURES DE PRÉCISION

La montée en puissance et la diversité croissante des **mesures de précision** sont portées par les avancées réalisées ces dernières années dans le domaine des horloges atomiques et nucléaires, des capteurs à base de spins tels que les magnétomètres atomiques ou à centres colorés dans le diamant, de l'interférométrie optique et atomique, de la spectroscopie des ions lourds ou des molécules, des capteurs opto-mécaniques ou à circuits supraconducteurs... Les progrès récents sont annonciateurs d'avancées significatives à l'échelle d'une décennie au moins, grâce à la convergence d'un large éventail de technologies et de méthodologies. Celles-ci couvrent le contrôle à l'échelle quantique de systèmes de complexité croissante, de l'atome jusqu'à des dispositifs de taille mésoscopique voire macroscopique, l'extension de la **métrologie temps/fréquence** ainsi que des dispositifs photoniques (sources lasers, peignes de fréquence, détecteurs ultra-sensibles...) à des fenêtres spectrales jusque-là inaccessibles avec des puretés spectrales inégalées et des gammes de puissances étendues du photon unique au petawatt. On peut aussi mentionner les nouvelles installations pour la production de faisceaux exotiques et le piégeage d'ions lourds multichargés ainsi que les détecteurs micro-calorimétriques à transitions supraconductrices ou magnétiques pour des mesures d'énergies de rayons X ou d'électrons.

Il y a aujourd'hui un foisonnement de nouveaux objets d'étude qui présentent une sensibilité accrue pour sonder la variation des constantes fondamentales, tester les symétries fondamentales et l'électrodynamique quantique aux ordres supérieurs ou rechercher des signatures de matière noire et de nouvelles sources d'ondes gravitationnelles. Une même plateforme est d'ailleurs souvent exploitable pour une variété de mesures. Les horloges et capteurs quantiques affichent déjà des per-

formances remarquables. Mais l'ensemble des expériences dédiées aux mesures de précision a un potentiel de progression et de renouvellement indiscutable, tout d'abord via l'amélioration des dispositifs expérimentaux existants en termes de bruit/stabilité et biais/exactitude, mais aussi via l'exploitation des phénomènes quantiques les plus poussés tels que 1) l'intrication et la génération d'états comprimés de spin ou de lumière pour atteindre des sensibilités au-delà de la limite quantique standard, 2) le contrôle quantique optimal, 3) les mesures combinant plusieurs sous-systèmes couplés (certains servant à sonder l'environnement ou à protéger de la décohérence en utilisant par exemple la contre-réaction en temps réel et des protocoles de découplage de l'environnement). En outre, l'hybridation entre différents capteurs devrait permettre un gain substantiel en sensibilité et un accès à des grandeurs d'intérêt nouvelles. De même, la mise en réseau des horloges et capteurs quantiques à l'échelle continentale et au-delà promet des avancées significatives qui devraient surpasser la portée des capteurs individuels. L'exploitation de références de fréquence de qualité métrologique d'une stabilité relative meilleure que 10^{-15} après 1 s d'intégration et, dans le futur, de l'intrication, mais ici délocalisée entre nœuds du réseau et du partage de sources de lumière comprimée pourrait révolutionner le domaine des mesures de précision à l'échelle de 10 ans.

L'espace est également un environnement propice pour les mesures de précision. Les expériences de physique quantique dans l'espace suscitent une attention croissante en raison des nombreuses possibilités qu'elles offrent pour tester les lois fondamentales de l'univers, que ce soit avec des atomes froids, des dispositifs photoniques ou opto-mécaniques. Renforcer la collaboration entre le CNRS et les acteurs de la recherche spatiale en France et en Europe est crucial au moment où d'autres nations comme la Chine et les USA se lancent dans des projets d'envergure. Les laboratoires souterrains offrent aussi un environnement protégé et sont une alternative à l'espace. Signalons enfin le potentiel des expériences de gravité analogue exploitant les fluides quantiques de lumière ou les condensats de Bose-Einstein pour simuler la physique d'un trou noir ou l'expansion de l'univers primordial.

PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE, RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET GRAVITATION

Les mesures de précision dans divers domaines permettent de réaliser des tests en champ gravitationnel faible sur Terre, au voisinage de la Terre et dans le système solaire.

Une partie de ces tests reposent sur des missions spatiales embarquant de l'instrumentation dédiée et très poussée. Après la mission spatiale MICROSCOPE qui a récemment établi l'état de l'art en matière de test de l'universalité de la chute libre avec des objets macroscopiques, une version avancée de cette mission est

¹ Réseau fibré pour la comparaison temps-fréquence avec connexions européennes et au CERN, labellisé en 2021. www.refimeve.fr

considérée. Une autre possibilité, déclinée dans la proposition STE-QUEST, est une mission qui étend ce test à des objets microscopiques grâce à l'interférométrie atomique. Parallèlement, des expériences de laboratoire, récemment mises en œuvre en Allemagne, aux USA et en France, comparent la chute libre de deux espèces atomiques. Elles ont un fort potentiel de développement avec l'avantage de pouvoir diversifier les tests, entre plusieurs isotopes d'une même espèce, entre des espèces atomiques différentes, ou entre matière et antimatière avec les expériences GBAR, AEGIS et ALPHA.

Concernant les tests de la relativité générale via des mesures de déplacement gravitationnel vers le rouge, la première perspective est de mener à bien la mission ACES qui doit voler en 2025 et permettre de dépasser le résultat obtenu avec l'exploitation opportuniste des satellites Galileo 5 et 6. Par ailleurs, les horloges optiques et les méthodes associées ont récemment donné un test compétitif au sol dans la Tokyo Skytree. Les progrès en cours des horloges et des liens optiques (par fibres et en espace-libre) permettront de gagner au moins un ordre de grandeur. Les tests d'invariance locale de position de type mesure différentielle de déplacement gravitationnel vers le rouge (*null redshift*), qui peuvent être de plus analysés comme des tests de variation des constantes fondamentales en fonction du potentiel, bénéficieront d'une progression constante des horloges, avec des stabilités et exactitudes attendues dans les années à venir au niveau de 10^{-20} et 10^{-19} respectivement, et de la spectroscopie moléculaire ultra-précise. Il en va de même pour les tests de variations en fonction du temps qu'on peut exploiter pour contraindre certains modèles cosmologiques combinés à des théories alternatives visant à unifier gravitation et physique quantique. Ces expériences ont un fort potentiel d'amélioration par le raffinement des dispositifs expérimentaux existants ainsi que par l'utilisation des liens optiques fibrés cohérents, la mise en réseau donnant accès à des mesures plus diversifiées. Pour cela, la France dispose d'un atout très important qu'est l'infrastructure de recherche REFIMEVE.

Un autre axe est celui de l'étude puis de l'utilisation de nouvelles espèces particulièrement prometteuses parce qu'elles possèdent des transitions hautement sensibles ou avec des sensibilités complémentaires, comme la transition nucléaire isomérique du ^{229}Th , ou des niveaux métastables d'ions lourds multichargés, ou dans des molécules, éventuellement, avec des noyaux lourds exotiques.

Un troisième axe consiste à étendre ces tests à des situations nouvelles faisant intervenir les superpositions quantiques délocalisées. Les progrès attendus sur les dispositifs expérimentaux mentionnés ci-dessus permettent aussi, via la recherche de signaux temporels de signatures particulières, de pousser les tests d'invariance de Lorentz. La précision des horloges, toujours en forte progression, permet, depuis quelques années seulement, d'observer le déplacement gravitationnel vers le rouge

dans des dispositifs de laboratoire. Cela rend possible une nouvelle catégorie d'expériences qui explore la frontière entre relativité générale et mécanique quantique en réalisant des expériences où les deux interactions exercent en même temps une influence observable. Des perspectives similaires existent à partir de dispositifs de type interféromètre atomique opérés individuellement ou en réseaux. Dans cette catégorie, on peut inclure des expériences visant à tester les limites à la cohérence des superpositions quantiques macroscopiques sous l'effet de l'interaction gravitationnelle.

Une autre catégorie d'expériences concerne la simulation de la théorie quantique des champs en espaces courbes en utilisant d'autres systèmes physiques que la gravitation. Les fluides quantiques font partie des systèmes prometteurs pour étudier, par exemple, le rayonnement de Hawking ou les états métastables typiques de l'inflation.

ONDES GRAVITATIONNELLES

Le domaine des mesures de précision apporte une contribution spécifique à la thématique des ondes gravitationnelles sous plusieurs aspects.

Premièrement, le développement et la mise en œuvre de méthodes susceptibles d'améliorer les grands instruments existants, basés sur l'interférométrie optique. Il s'agit d'exploiter notamment les avancées de l'opto-mécanique pour réduire ou maîtriser le bruit thermique des miroirs et par ailleurs l'utilisation d'états non classiques de la lumière pour atteindre des sensibilités dépassant la limite quantique standard.

Deuxièmement, l'utilisation de l'interférométrie atomique peut permettre, pour les instruments au sol, de maîtriser le bruit newtonien et d'étendre ainsi la fenêtre de sensibilité vers les basses fréquences. Le laboratoire souterrain LSBB qui accueille le projet MIGA pour étudier ces questions est en atout français à valoriser et à coordonner avec d'autres projets européens ayant des objectifs similaires. Les mesures de précision sont également mises à profit pour fournir des dispositifs de référence et de l'expertise dans le cadre de la contribution française à la mission LISA qui comporte notamment l'intégration et la validation des satellites.

Enfin, des travaux visent l'utilisation de l'interférométrie atomique ou d'horloges optiques pour de futures missions. Ils concernent à la fois des aspects technologiques pour la spatialisation, des aspects instrumentaux pour comprendre et adapter les instruments à l'environnement spatial et des aspects de conception et de modélisation de missions prenant en compte les caractéristiques spécifiques de ces instruments. Ces travaux sont souvent en synergie avec des développements instrumentaux ou des missions dans le domaine des sciences de la Terre (géodésie, systèmes de référence et positionnement) et également de l'exploration du système solaire.

TEST DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (QED)

Les tests de précision de la QED sont effectués en comparant aux prédictions du modèle standard les résultats expérimentaux des propriétés de particules libres comme l'anomalie du moment magnétique de l'électron ($g_e - 2$) et des fréquences de transition entre niveaux d'énergie de particules liées comme le déplacement de Lamb.

La théorie perturbative de la QED en champ faible est bien établie et elle a été confirmée par l'accord remarquable entre les valeurs théorique et expérimentale de $g_e - 2$. Ces comparaisons sont aussi une approche prometteuse pour rechercher des signatures de la physique au-delà du modèle standard. Pour cela, il est crucial d'affiner les incertitudes sur les mesures de spectroscopie des systèmes simples (hydrogène atomique ou moléculaire, positronium...) et de certaines espèces atomiques et de la constante de structure fine α qui repose sur l'interférométrie atomique.

Dans le régime des champs intenses, les effets non linéaires ne peuvent plus être ignorés et la théorie n'a pas été testée au-delà du premier ordre. Les ions lourds multichargés sont d'excellents candidats pour observer ces effets. Par exemple, l'électron le plus interne des nucléides lourds comme le plomb ou l'uranium est exposé à un champ de Coulomb du noyau d'environ 10^{16} V cm⁻¹, une valeur difficilement atteignable en laboratoire par d'autres moyens. Dans un tel champ, les effets QED fortement exaltés se manifestent dans les énergies de liaison et les moments magnétiques des électrons considérés, à un niveau mesurable. Dans les années à venir, la spectroscopie des ions lourds multichargés devrait permettre d'observer les contributions des termes QED d'ordres 2 et 3, grâce notamment aux performances de la nouvelle génération de détecteurs dans la gamme d'énergie 20-100 keV. L'étude de différents isotopes est nécessaire pour différencier les contributions QED de celles liées à la structure du noyau. La spectroscopie d'atomes exotiques dans des états de Rydberg circulaires est à explorer, car moins sensible aux effets du noyau et plus sensible à la structure du vide.

Une meilleure compréhension de la structure du vide grâce aux atomes exotiques où le champ électrique moyen est des ordres de grandeur au-dessus de la limite de Schwinger, ou dans des champs supercritiques susceptibles de créer des paires électron-positron par « désintégration du vide », pourrait aussi aider à la compréhension de l'évolution des trous noirs liée à la création de particules dans le vide. L'exploitation des résultats de ces expériences nécessite le développement de nouvelles approches théoriques et numériques pour calculer la contribution des termes QED d'ordre 2, voire 3, à l'énergie et aux facteurs de Landé des atomes (y compris exotiques) etc. Enfin, dans les prochaines années l'infrastructure Apollon devrait atteindre l'intensité critique pour la génération de paires e^+e^- ou pour la

manifestation de la biréfringence du vide, ouvrant ainsi une nouvelle ère pour l'étude du vide quantique.

PROBLÈME DE L'EFFONDREMENT DE LA SUPERPOSITION QUANTIQUE

De nombreuses approches expérimentales sont proposées pour sonder les mécanismes à l'origine de l'effondrement de la superposition quantique avec des masses, des tailles et à des échelles de temps de plus en plus élevées. Ceci résulte des progrès récents dans le contrôle des degrés de liberté internes de molécules massives, l'ingénierie photonique et la conception de résonateurs nano-mécaniques avec des facteurs de qualité atteignant 10^9 dans un environnement cryogénique.

Parmi ces expériences citons : 1) l'interférométrie d'ondes de matière avec des condensats de Bose-Einstein ou des grosses particules telles que les molécules organiques et les nanoparticules ; 2) la spectroscopie à très haute résolution de molécules non-rigides possédant comme l'ammoniac ou les molécules chirales une dynamique interne régie par effet tunnel entre puits de potentiel ; 3) la création d'un chat de Schrödinger massif en couplant un résonateur nano mécanique avec un qubit supraconducteur.

Mentionnons aussi le projet MAQRO (*macroscopic quantum resonators*) en cours d'évaluation par l'ESA pour étudier la superposition quantique avec des nanoparticules dans l'espace. Ces expériences visant à placer des objets massifs en superposition quantique devraient par exemple atteindre un régime où le taux d'effondrement gravitationnel prédit par le modèle Diósi-Penrose dépasse tous les autres mécanismes de décohérence.

SYMÉTRIES FONDAMENTALES DISCRÈTES

Il est possible de tester les prévisions du modèle standard (MS) et d'en explorer les limites par des tests à basse énergie de symétries fondamentales avec des atomes, des molécules, des neutrons... Des mesures de violation de la symétrie de parité (P) dans le césium ont fourni le test le plus précis du secteur électrofaible à basse énergie, et des contraintes pour la physique au-delà du MS. Des expériences recherchent une brisure de la symétrie par renversement du temps (T) sans laquelle le déséquilibre matière-antimatière observé ne peut être expliqué, en cherchant à mesurer le moment dipolaire électrique (EDM) de l'électron, du neutron et des noyaux. En effet, certaines extensions au MS, introduisent des sources de violation de T — donc de CP, avec C la symétrie par conjugaison de charge, si l'on suppose l'invariance par CPT satisfaite — associées à de nouvelles particules ayant une masse à l'échelle du TeV. Elles prédisent une valeur de l'EDM de l'électron qui frôle les contraintes les plus strictes imposées par des expériences sur des molécules diatomiques comme ThO ou HfF⁺. Ces expériences sondent donc la physique à des échelles d'énergie comparables à celles des accélérateurs, voire au-delà. Tester

l'invariance par CPT, la symétrie par permutation de particules identiques, la relation spin-statistique... sont autant d'autres défis persistants à relever. Ces expériences relèvent de la résonance magnétique nucléaire, la magnétométrie, l'interférométrie, la spectroscopie de précision, la métrologie des fréquences. Elles bénéficient des avancées réalisées dans la production, le refroidissement et l'ingénierie quantique d'atomes et molécules neutres ou ionisés variés et de complexité croissante.

Parmi les enjeux pour la prochaine décennie on trouve (I) la recherche de signatures de l'EDM de l'électron, du proton, du neutron, et de sources de violation de T hadronique (moments nucléaires de Schiff ou magnétiques quadripolaires); (II) la mise en évidence des effets de violation de P dépendants du spin nucléaire particulièrement sensibles à de la nouvelle physique comme le couplage entre le moment anapolaire d'un noyau (provenant des interactions faibles hadroniques) et le spin d'un électron (seul le moment anapolaire du ^{133}Cs a été mesuré, et il est en désaccord avec les prédictions déduites d'autres mesures); (III) la mesure de la violation de P dans les ions héliumoides lourds qui présentent des sensibilités potentiellement accrues de plusieurs ordres de grandeur comparées au césium; (IV) la mesure de la différence d'énergie entre énantiomères d'une molécule chirale résultant de la violation de P .

Une approche prometteuse est celle des systèmes dont la sensibilité aux effets mesurés est accrue: atomes lourds et déformés (Fr, Ra⁺, ions héliumoides...), mais aussi molécules, objets de progrès récents remarquables en matière de refroidissement, piégeage et manipulation cohérente. La tendance est à la conception, en interaction avec des chimistes, de molécules sur mesure à la fois plus sensibles, et fonctionnalisées pour permettre le refroidissement laser, une détection optique de haute sensibilité, la protection contre la décohérence...

Une alternative à l'étude d'échantillons en phase gazeuse est celle en plein essor des expériences en cristaux ou matrices qui permettent un gain considérable sur la densité de l'échantillon, et donc sur la sensibilité à condition que les effets systématiques soient maîtrisés. Soulignons l'importance des mesures de précision sur l'antimatière et particulièrement l'antiproton et l'anti-hydrogène qui ont connu des progrès significatifs au cours des dernières années. La comparaison des propriétés des particules et antiparticules (masse, moment magnétique et fréquences de transition) permet de tester la symétrie CPT dont la violation serait une signature sans équivoque d'une nouvelle physique.

MATIÈRE NOIRE ULTRA-LÉGÈRE

La recherche de matière noire basée sur des expériences de laboratoires concerne des masses inférieures à 1^{-10} eV et fait l'objet d'un intérêt très fort. De premières expériences ont été proposées et réalisées en exploitant la stabilité des horloges atomiques et des données existantes.

Par exemple, la comparaison de fréquences atomiques hyperfines de la fontaine à atomes froids double Rb/Cs pour rechercher un champ scalaire massif qui pourrait constituer la matière noire. On s'attend à ce qu'un tel champ oscille à une fréquence qui est proportionnelle à sa masse, qui pourrait donc induire des variations périodiques des constantes fondamentales de la physique comme la constante de structure fine, ou les masses des particules élémentaires. Ces constantes impactent directement le ratio des fréquences atomiques. Avancer cette recherche passe par plusieurs axes de développement.

Une première catégorie de test repose sur l'analyse de mesures de précision de type spectroscopie atomique ou moléculaire, interférométrie, magnétométrie, etc., distribuées spatialement et temporellement. Pousser ce type de recherche passe par l'amélioration des bruits et de la précision de ces systèmes. Cela passe aussi par la diversification des systèmes (utilisation de nouvelles espèces atomiques et moléculaires et également de résonateurs, de lignes à retard fibrées, par exemple) qui renforce les opportunités de détection et permet d'obtenir des signatures claires et spécifiques aux modèles de matière noire considérés. Un saut qualitatif très important viendra de la mise en réseau et de la coordination des diverses expériences, pour obtenir des prises de données nouvelles, nombreuses, continues et simultanées. Dans cette optique, l'infrastructure de recherche REFIMEVE constitue pour ce type d'expérience un fort atout français et européen pour la mise en réseau d'horloges et d'expériences de spectroscopie, pour la comparaison de fréquences à mieux que 10^{-19} . De futures expériences de recherche de matière noire utiliseront par exemple, des comparaisons de 10 à 20 horloges et systèmes moléculaires divers à travers le réseau fibré européen sur plusieurs mois, coordonnées avec des actions similaires aux USA et en Asie et avec des mesures issues de magnétomètres, d'interféromètres atomiques, etc.

Une autre voie en pleine expansion consiste en l'utilisation de réseaux corrélés d'interféromètres atomiques déployés sur des longueurs de base allant de la centaine de mètres au kilomètre, dont l'antenne MIGA constitue une plate-forme de test unique à l'échelle internationale. De telles recherches permettent de tester des modèles de matière noire de type *ultra-light dark matter* dans une gamme de masse allant de 10^{-22} à 10^{-9} eV, déterminée par les durées caractéristiques des observations. Une forte activité de modélisation globale de ces expériences sera nécessaire à l'interface entre, d'une part, la physique atomique et moléculaire, l'optique quantique, et l'astrophysique d'autre part.

Une autre catégorie de tests, qui permettent d'explorer des masses plus élevées (jusqu'à environ 10 eV) incluant la gamme supposée des particules axioniques, se fonde sur des expériences dédiées visant à créer les conditions d'une interaction entre particules de matière noire et un champ (champ magnétique ou laser intense) induisant la création d'une particule standard (typiquement un pho-

ton) qu'il s'agit de détecter. Ces expériences reposent sur le fait de pousser à leurs limites des méthodes de détection ultra-sensibles (par exemple, détection de photons micro-ondes uniques à l'aide d'un circuit supraconducteur, etc.).

RECHERCHE DE NOUVELLES INTERACTIONS À BASSE ÉNERGIE

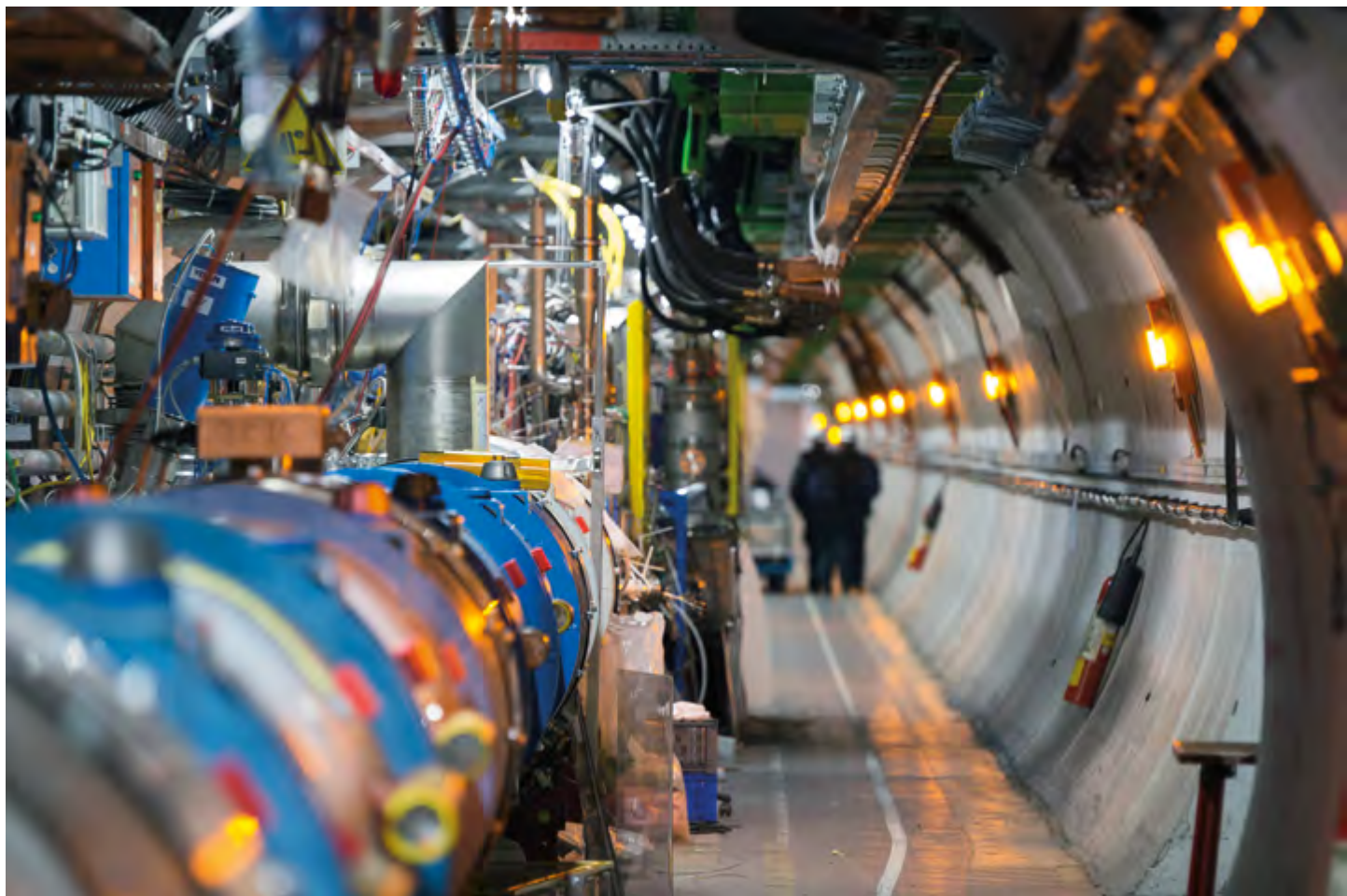
Les expériences évoquées dans les paragraphes précédents permettent de fournir des contraintes toujours plus sensibles sur une variété de scénarios pour la physique au-delà du MS (non seulement les signatures de la matière noire, mais aussi d'énergie noire, d'une 5e force, d'interaction exotiques dépendantes du spin...). Un travail conjoint entre théoriciens et expérimentateurs est indispensable pour concevoir les nouveaux schémas expérimentaux les plus pertinents, pour l'analyse des données, l'interprétation des résultats et la prédiction des quantités non encore mesurées.

Une stratégie nouvelle consiste par exemple à conduire une analyse globale auto-cohérente de l'ensemble des données de spectroscopie d'atomes (y compris exotiques), molécules et ions via un ajustement simultané des constantes fondamentales et des paramètres décrivant la nouvelle physique. Récemment, une première analyse a

révélé des tensions liées notamment à la détermination du rayon de charge du proton. Parmi les extensions du modèle standard testées, l'une d'entre elles réduit ces tensions. Un enjeu dans les prochaines années sera d'affiner cette analyse, en l'enrichissant avec de nouvelles données expérimentales (ex. : $g-2$ du muon, spectroscopie du muonium...), en améliorant encore la précision des expériences (hydrogène normal et muonique, ions moléculaires hydrogène, constante de structure fine...) et des prédictions théoriques, pour déterminer si le «signal» observé est significatif. Cette approche peut être étendue à de nouvelles particules se couplant à une seule espèce (électron ou muon par exemple) grâce à leur contribution aux corrections à une boucle. Ces contributions permettraient aussi d'explorer de nouvelles particules avec P ou CP impair. L'extension aux spectroscopies de structure fine/hyperfine permettrait en particulier de contraindre des interactions au-delà du MS dépendantes du spin.

Un autre outil pour contraindre la nouvelle physique est la mesure de déplacements isotopiques permettant de tracer des «King plots». De nombreuses études expérimentales ont été publiées ces dernières années. Il serait intéressant de les étendre à d'autres espèces (atomes neutres ou ions) pour améliorer la sensibilité de ces recherches et mieux comprendre les éventuelles non-linéarités d'origine nucléaire ou exotique des «King plots».

Tunnel du LHC. © Cyril FRESILLON/LHC/CNRS Images



SIGLES

Λ CDM: Lambda Cold Dark Matter. Lambda Matière Noire Froide. Λ fait référence à la constante cosmologique

p_T : Impulsion transverse

AdS Anti-de-Sitter

BELLE-II: B-factory experiment. Expérience usine de mésons B, à KEK, laboratoire national des hautes énergies japonais à Tsukuba. Opérationnelle jusqu'en ~ 2025

CFT: Conformal Field Theory. Théorie des champs conforme

CODATA: Committee on Data for Science and Technology

CP: La symétrie CP est une combinaison de deux symétries fondamentales: la symétrie de charge (C) et la symétrie de parité (P). La présence d'un moment électrique dipolaire est signe d'une violation de cette symétrie. Cette violation est un des ingrédients pour expliquer l'asymétrie matière anti-matière

CTA: Cherenkov Telescope Array. Projet international d'observatoire terrestre de rayons gamma de très haute énergie. En construction

DFT: Density Functional Theory. Théorie de la fonctionnelle de densité (pour le calcul des structures électroniques et les propriétés des matériaux)

DUNE: Deep Underground Neutrino Experiment. Projet d'expérience de neutrinos en profondeur souterraine, USA

EFT: Effective Field Theory. Théorie effective des champs

EHT: Event Horizon Telescope. Réseau mondial de télescopes utilisé pour observer, en particulier, les trous noirs supermassifs. En avril 2019 EHT a fourni la première image directe d'un trou noir. L'image montre un anneau lumineux brillant, connu sous le nom de «l'ombre du trou noir», qui est l'horizon des événements du trou noir lui-même

EMRI: Extreme Mass Ratio Inspiral. Inspirale à rapport de masse extrême

EN: Étoile(s) à neutrons

EPTA: European Pulsar Timing Array. EPTA est une des collaborations internationales travaillant sur les pulsars et les ondes gravitationnelles, aux côtés d'autres projets tels que le NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) aux États-Unis et le PPTA (Parkes Pulsar Timing Array) en Australie

ET: Einstein Telescope. Projet de 3^e génération de détecteur d'ondes gravitationnelles

Euclid: Télescope spatial lancé le 1^{er} juillet 2023. La mission (sur 6 ans) d'Euclid de l'ESA est conçue pour explorer la composition et l'évolution de l'Univers sombre. Il permettra de créer une grande carte de la structure à grande échelle de l'Univers

GPU: Graphics Processing Unit. Unité de traitement graphique : composant matériel spécialisé dans les calculs graphiques et parallèles. Son architecture permet d'accélérer diverses tâches, allant de la visualisation graphique aux calculs scientifiques et à l'apprentissage automatique

Gravity+: GRAVITY+ est la phase 2 du projet GRAVITY installé sur le grand interféromètre, VLTI (Very Large

Telescope Interferometer de l'Observatoire Européen Austral (ESO) au Chili

HyperK: Hyper-Kamiokande. Projet de détection des neutrinos en développement au Japon

Kagra: Kamioka Gravitational-wave Detector. Détecteur d'ondes gravitationnelles à Kamioka (Japon)

KM3NeT: Cubic Kilometer Neutrino Telescope. Projet d'observatoire, réseau de télescopes, de neutrinos à grande échelle dans les profondeurs de la mer Méditerranée

LBNF: Long-Baseline Neutrino Facility. Fait partie du projet DUNE

LHC: Large Hadron Collider. Le grand collisionneur hadronique au CERN à Genève

LHCb: Large Hadron Collider beauty experiment. Un des 4 détecteurs auprès du LHC, celui-ci est destiné à l'étude de la physique de la saveur (lourde) hadronique, notamment la physique du b

LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser (USA)

LISA: Laser Interferometer Space Antenna. Antenne spatiale d'interférométrie laser. Le projet LISA est développé par l'Agence spatiale européenne (ESA) en collaboration avec la NASA. Il est prévu que les premiers satellites soient lancés dans les années 2030

LiteBird: Lite (Light) Satellite for the Study of B-mode Polarization and Inflation from Cosmic Microwave Background Radiation. Il s'agit d'un projet de mission spatiale pour étudier le fond diffus cosmologique (CMB) et plus particulièrement la polarisation des modes B

LSS: Large-Scale Structure. Structure à Grande Échelle

LVK: Le réseau Ligo-Virgo-Kagra

MERA: Multi-Scale Entanglement Renormalization Ansatz. Ansatz de renormalisation d'entrelacement à échelles multiples

MN: Matière Noire

NRT: Nançay Radio Telescope

OG: Ondes Gravitationnelles

pdf Parton distribution function. Fonction de distribution des partons

PNGRAM: Programme National Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie. Le PNGRAM est financé par CNRS Terre & Univers, CNRS Nucléaire & Particules, CNRS Physique et le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

QCD: Quantum Chromodynamics. Chromodynamique Quantique

QFT: Quantum Field Theory. Théorie quantique des champs

QGP: Quark Gluon Plasma. Plasma de quarks et gluons

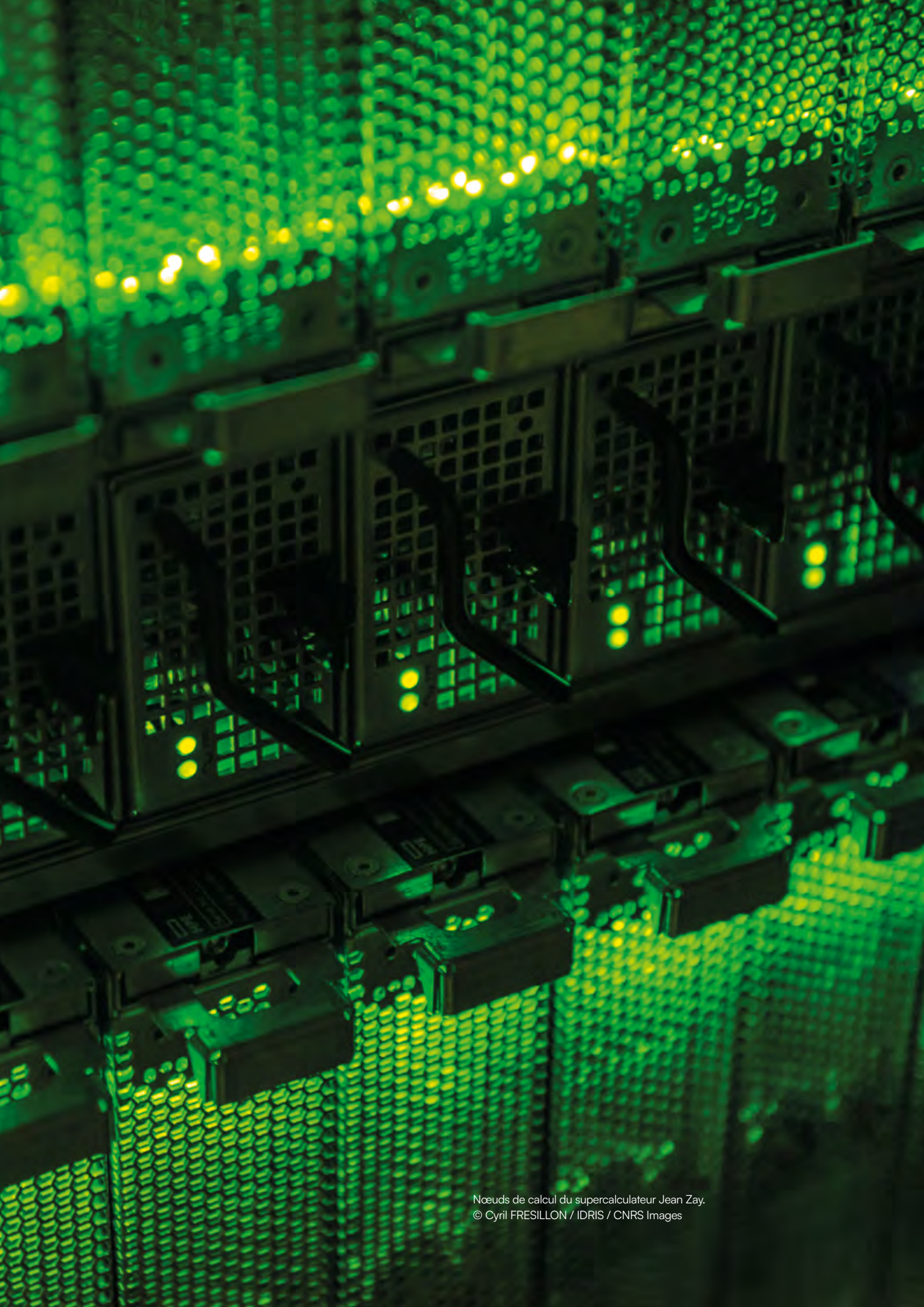
RG: Relativité Générale

SYK: Modèle Sachdev-Ye-Kitaev

SYM: Super Yang — Mills

Virgo: Virgo Interferometric Gravitational-Wave Observatory. Interféromètre VIRGO pour l'observation des ondes gravitationnelles. Implanté en Italie

WIMP: Weakly Interactive Massive Particle. Particules massives interagissant faiblement



Nœuds de calcul du supercalculateur Jean Zay.
© Cyril FRESILLON / IDRIS / CNRS Images

Nouveaux enjeux pour les méthodes numériques

RÉSUMÉ

La physique numérique, troisième pilier et lien essentiel entre la physique théorique analytique et les expériences, englobe à CNRS Physique de multiples domaines scientifiques, allant de la résolution de modèles quantiques pour les problèmes à N -corps à la science des matériaux, de la matière molle à la physique des plasmas et des hautes énergies. Le rôle des simulations numériques y est de plus en plus vaste, et a été récemment accentué par l'émergence du **calcul quantique** et de **l'intelligence artificielle/apprentissage** automatique (IA/ML). Au-delà des effets de mode, les avancées permises par l'IA/ML justifient d'explorer leurs potentialités et de familiariser les chercheurs avec celles-ci pour en tirer pleinement parti. Il est également important de reconnaître que le ML est avant tout un outil et de sensibiliser aux limites, aux dangers et aux défis associés, tels que la fiabilité des résultats, la durabilité des outils, la pré-évaluation des investissements nécessaires et la concurrence avec le secteur privé. De même, il est essentiel de rester réaliste quant aux promesses du calcul quantique, tout en reconnaissant la dimension exploratoire et fascinante de la recherche dans ce domaine. Certaines problématiques communes à toutes la physique peuvent apparaître plus aiguës pour la physique numérique : en particulier, son **impact environnemental** demande une utilisation responsable, et le manque de diversité y est peut-être encore plus frappant que dans d'autres secteurs de la physique. De plus, la formation en matière de numérique nécessite souvent d'être reprise et remise à jour après les études supérieures. Cependant, ce champ fait preuve d'une dynamique remarquable, et d'ici à 2030, nous verrons l'exploration de territoires encore mal arpentés par ces méthodes, tels que les phénomènes quantiques émergents, les matériaux en conditions extrêmes, les systèmes biologiques, la modélisation multi-échelle des systèmes complexes, la fusion inertielle, les caractéristiques de l'Univers primordial, et maintes autres directions dont nous ignorons à ce jour peut-être même l'existence.

Nouveaux enjeux pour les méthodes numériques

LA PHYSIQUE NUMÉRIQUE, UN PILIER EN FORTE ÉVOLUTION

Les calculs accompagnent la recherche en physique depuis longtemps, et la calculatrice, puis les ordinateurs de bureau sont devenus des outils de travail pour la majorité des physiciennes et physiciens. Progressivement, le développement incomparable des machines de calcul a ouvert de nouvelles possibilités et donné naissance à un troisième pilier de la recherche, entre théorie analytique et physique expérimentale, distinct des deux, mais proposant un lien. Comme souvent, l'outil nouveau répond à des besoins et stimule des idées nouvelles. La multitude des recherches en physique numérique va bien au-delà d'une simple numérisation des études analytiques. On assiste à une révolution continue à plusieurs niveaux : révolutions de précision avec laquelle on peut décrire la nature, de rapidité avec laquelle on peut obtenir des réponses, de complexité qui nous rapproche de plus en plus des systèmes en situation réelle, même *operando* (cas des jumeaux numériques), d'exploration de mondes inconnus, que ce soit des matériaux en conditions extrêmes, du monde quantique ou des comportements collectifs qui ouvrent des horizons qualitativement nouveaux. Ces révolutions multiples sont soutenues par le développement du matériel (supercalculateurs parallèles, processeurs graphiques), mais aussi par des approches théoriques nouvelles, d'algorithmes intelligents, de codes partagés. Elles nourrissent d'autres champs de recherche et créent de nouveaux besoins de collaborations, donnant ainsi une importance croissante aux interfaces entre la physique et les mathématiques, la chimie, la biologie ou l'informatique. Loin de voir sa dynamique ralentir, le domaine de la physique numérique a été régulièrement revivifié, par les calculs massifs haut débit, haute performance et le traitement de données à grande échelle dans un passé récent, par les nouvelles révolutions de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage statistique (*machine learning*, ML) ainsi désormais que du calcul quantique. Sans pouvoir prédire en détail ce qui en sortira, le foisonnement des idées est évident, et parmi les différents chemins explorés avec enthousiasme par les scientifiques, certains nous porteront très loin.

La physique numérique est présente dans toutes les sections du comité national de la recherche scientifique rattachées à CNRS Physique, résultant en une grande diversité de méthodes et d'enjeux associés.

CHAMPS DISCIPLINAIRES

PHYSIQUE ATOMIQUE, SIMULATIONS QUANTIQUES

Simulations quantiques. Le domaine des simulations par des plateformes quantiques bénéficie d'un engouement international exceptionnel, destiné à s'accroître à l'horizon 2030. La France est relativement bien positionnée au niveau matériel, avec plusieurs plateformes de pointe opérées par des acteurs académiques et privés. Elle accuse certainement un retard au niveau logiciel, non au niveau de l'informatique quantique théorique, mais plutôt des simulations classiques de (ou sur) les plateformes NISQ (*noisy intermediate scale quantum*). Avec le nombre encore incertain de qubits et l'avancée des méthodes classiques (notamment en ML), il n'est pas clair que la suprématie quantique, à savoir des résultats obtenus sur une plateforme quantique non atteignables par une simulation classique, soit effective en 2030. Il est probable que la suprématie et le passage à l'échelle surgiront en premier par des calculs quantiques hybrides, mélangeant des méthodes classiques (méthodes expertes comme les réseaux de tenseurs, méthodes d'*embedding* ou bien ML pour optimiser les portes quantiques) et l'utilisation du processeur quantique réduite à la tâche où il est le plus efficace (par exemple, trouver l'état fondamental d'un problème réduit). L'objectif qui semble atteignable le premier est la simulation quantique de la dynamique de systèmes quantiques fortement hors équilibre, sur des temps plus longs que ceux accessibles aux simulations classiques.

De nombreux sous-produits sont à attendre d'études numériques approfondies sur le sujet : le perfectionnement des ordinateurs quantiques et de leur protocole d'utilisation, des méthodes classiques expertes poussées dans leurs retranchements, une meilleure compréhension de la physique riche de ces plateformes (équations maîtresses hors équilibre, transition vers le chaos), les algorithmes dé-quantifiés, prévus initialement pour les simulateurs quantiques, mais utiles aussi pour des problèmes classiques, etc. Il existe un grand travail de création d'algorithmes hybrides à effectuer, plateforme par plateforme, pour exploiter au mieux l'intrication dans ces simulateurs.

Systèmes quantiques hors équilibre. À la frontière entre physique atomique, photonique, matière condensée, phy-

sique statistique et mathématique, l'étude des systèmes quantiques fortement hors équilibre est un domaine avec un fort couplage entre expériences (plateformes de simulations quantiques, expériences pompe-sonde), théorie et numérique. Pour les simulations, le problème du passage à l'échelle (plus grands systèmes quantiques, temps plus longs) est conséquent et il est probable qu'il ne soit résolu qu'en cultivant un bouquet de méthodes. Un défi particulier est la résolution efficace de l'équation de Schrödinger stochastique obtenue par déroulement d'une équation maîtresse décrivant les systèmes à N -corps quantiques couplés avec un environnement (systèmes dissipatifs, mesure quantique). Les méthodes de réseaux de tenseurs doivent être améliorées pour franchir la barrière d'intrication qui les limite aux temps courts. Pour tous ces défis, le rapprochement entre méthodes (par exemple, réseaux de tenseurs et neuronaux, méthodes hydrodynamiques) ou la création d'autres classes de fonctions variationnelles adaptées sont à explorer.

PHYSIQUE DE LA MATIÈRE

Depuis les questions fondamentales jusqu'aux applications les plus poussées, les travaux en physique de la matière présentent un continuum d'approches numériques et de calculs à toutes les échelles.

Problème à N -corps quantique

Ce terme recouvre les situations dans lesquelles les interactions entre particules quantiques sont dominantes par rapport aux termes cinétiques, conduisant à l'échec des approximations à une particule. Les systèmes concernés sont les matériaux à forte corrélation électronique en matière condensée (supraconducteurs à haute T_c , isolants de Mott, antiferromagnétiques frustrés, fermions lourds, matériaux moirés, interfaces d'hétérostructures), les gaz atomiques ultra-froids (sur réseau optique ou non), les étoiles à neutrons, les plasmas chauds, etc. La complexité de ces problèmes, même dans des modèles simples, est exponentielle avec le nombre de degrés de liberté et une grande variété d'approches numériques est développée. Des avancées conceptuelles et algorithmiques importantes font espérer qu'à l'horizon 2030, des problèmes fondamentaux tels que le modèle de Hubbard fermionique en 2D seront résolus ou du moins bien compris. Y contribuera le progrès dans les méthodes comme par exemple la DMRG (groupe de renormalisation de la matrice densité) en $d > 1$ et à température finie, le champ moyen dynamique (DMFT) en *clusters*, le Monte-Carlo quantique (QMC), et surtout la combinaison de différentes méthodes. La convergence entre méthodes d'*embedding* en chimie quantique et des approches issues de la physique (DMFT) ainsi que la combinaison avec des calculs *ab initio* en DFT ou en théorie des perturbations à plusieurs corps (MBPT) permettront une description réaliste des matériaux. Pour ceci, il faudra développer des *solvers* plus puissants pour résoudre les situations physiques complexes (multi-orbitales, basse température, hors équilibre, etc.).

La France est à la pointe dans certains domaines (QMC diagrammatique par ex.), mais en retard dans d'autres (comme le ML pour la matière quantique corrélée), et reste globalement sous-représentée dans les approches numériques des corrélations fortes et ses grands codes libres. La dynamique récente de recrutements est toutefois positive. Un domaine où la France est trop peu représentée est celui des méthodes par réseaux de tenseurs basées sur la compression des fonctions d'onde (états produits de matrices, DMRG, etc.) qui sont polyvalentes (en température, systèmes à et hors équilibre, systèmes fermés ou couplés à un environnement), en forte croissance hors de nos frontières, et particulièrement adaptées à la simulation des plateformes de calcul quantique. Ces méthodes de compression des fonctions quantiques (discrètes) pourront être adaptées pour les fonctions continues présentant peu de corrélations entre différentes échelles, promettant un impact important pour la résolution d'EDP en dynamique des fluides, astrophysique, en ML, etc.

Développement des approches *ab initio*

Les approches *ab initio* permettent d'étudier les matériaux réels sans ajuster de paramètres sur des expériences. Les méthodes basées sur la fonction d'onde telles que le QMC offrent une grande précision pour l'énergétique, permettant notamment de prédire les diagrammes de phase de matériaux simples. Les approches basées sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) nécessitent une approximation, mais peuvent décrire l'état fondamental et les états excités (TDDFT) de matériaux plus complexes. Les approches basées sur les fonctions de Green utilisent souvent des approximations perturbatives (comme GW) et sont principalement utilisées pour calculer des spectres. De nombreux défis doivent encore être relevés dans ce domaine. D'une part, il est nécessaire **d'augmenter la précision et la fiabilité des calculs** afin de suivre l'amélioration de la précision expérimentale, et de garantir leur qualité avant d'intégrer les résultats dans les bases de données. Ceci implique de réaliser une comparaison systématique des approches, des codes, des fonctionnelles, ainsi que de mettre en place des estimateurs d'erreurs et des *workflows* robustes. Cette évolution requiert à son tour une mobilisation collective qui devra être soutenue. Il est également important de **développer de nouvelles fonctionnelles de la densité et des fonctions de Green**, ainsi que les algorithmes correspondants, afin d'élargir la gamme des matériaux accessibles et des propriétés (en particulier liées aux états excités ou hors équilibre). Les pistes prometteuses incluent l'hybridation avec d'autres approches telles que le QMC et le ML. **L'étude *ab initio* des couplages entre excitations élémentaires**, tels que électron-phonon, magnon-phonon, ou exciton-photon, revêt une grande importance pour des applications telles que le photovoltaïque, la spintronique, la supraconductivité, le calcul quantique ou la chimie dans les cavités optiques. Des développements sont également nécessaires pour accompagner **les nouvelles expériences de spectroscopie** résonnante, non linéaire, cohérente ou résolue en temps, et pour **prendre**

en compte des conditions expérimentales telles que la température. Par ailleurs, les développements visant les propriétés dépendant du moment angulaire orbital ou du spin et de leur couplage permettront par exemple l'étude des textures et de la dynamique de spin, les transitions de phase magnétiques induites par un laser, ou la description de couches magnétiques 2D, et présentent des enjeux importants en spintronique (et plus récemment en orbitronique). Enfin, le traitement quantique des noyaux légers est un domaine en plein développement, notamment pour décrire les matériaux en conditions extrêmes ou les supraconducteurs à base d'hydrures. Des progrès prometteurs sont observés dans des approches telles que les bains quantiques à bruits colorés, la dynamique moléculaire (MD) par intégrales de chemins, la dynamique de Bohm, le couplage électron-ion en QMC et la factorisation exacte.

Matière molle, physique statistique, matière complexe

La mécanique statistique est traditionnellement un domaine propice à l'utilisation de l'approche numérique. L'algorithme Monte-Carlo (MC) Metropolis a été historiquement introduit pour étudier l'équation d'état des systèmes de disques durs en s'appuyant sur les ensembles de Gibbs, la MD pour comprendre la dynamique des particules classiques en interaction. L'objectif général du domaine est de prédire les propriétés émergentes d'un grand nombre d'agents en interaction.

En physique des verres, des progrès significatifs ont été réalisés par exemple grâce à l'introduction d'algorithmes MC intelligents permettant l'exploration numérique d'états d'équilibre difficiles à atteindre, même dans un cadre expérimental. Cependant, une exploration complète de la dynamique de ces systèmes reste encore hors de portée. Ce problème ne peut pas simplement être résolu en augmentant la puissance de calcul et nécessite le développement de nouveaux algorithmes de simulation dynamique. L'utilisation de mouvements informés par l'IA/ML avec des pas de temps plus longs ou la mise en œuvre d'EDP stochastiques de champ (par ex. Dean-Kawasaki) sont des pistes prometteuses. Ces innovations seront essentielles pour mieux comprendre les comportements dynamiques de systèmes complexes bien au-delà des verres.

La mécanique statistique hors équilibre est centrale en biologie, en matière molle et pour les systèmes complexes en général. L'absence de modèles théoriques complètement maîtrisés souligne l'importance cruciale des simulations numériques. Par ex., l'étude de la matière active a permis de mieux comprendre l'organisation émergente des agents biologiquement actifs et d'explorer les propriétés clés des systèmes hors équilibre. En l'absence de connaissances *a priori*, le traitement automatisé des données massives expérimentales permet d'extraire des informations substantielles. Ici, l'application de techniques d'IA/ML pour l'apprentissage par équation est prometteuse pour découvrir des lois physiques grâce aux notions

de conservation et de symétrie. Les simulations seront cruciales aussi pour comprendre et maîtriser les matériaux actifs aux propriétés fascinantes telles que l'auto-assemblage, l'auto-réparation et les effets topologiques.

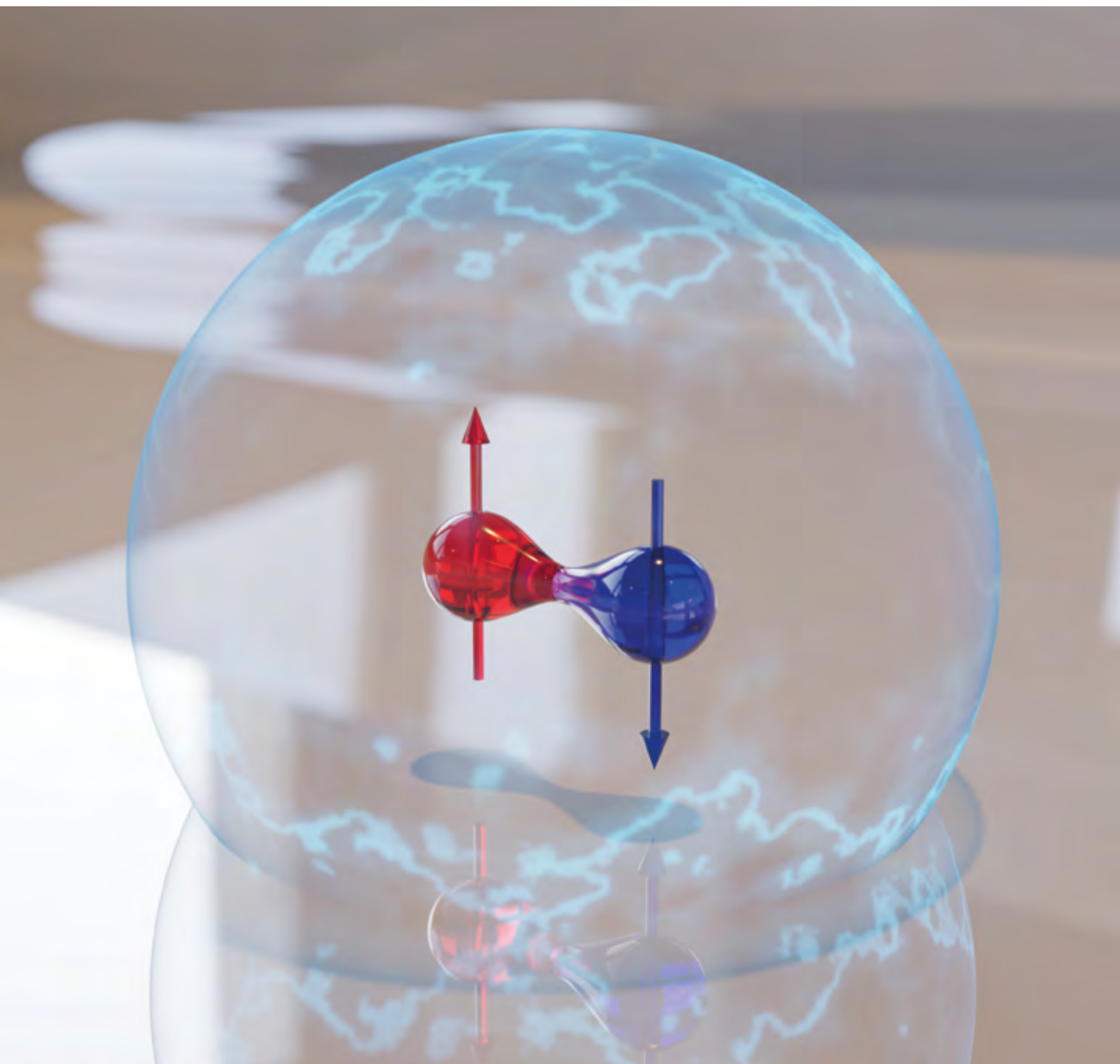
La matière molle est un domaine mature où théorie, simulations et expériences sont depuis longtemps connectées. À l'avenir, ces interactions doivent être renforcées par l'émergence de modèles plus avancés permettant de dépasser les simplifications présentes dans les modèles historiques. Plus spécifiquement, les techniques de modélisation devront être améliorées par une prise en compte plus réaliste de la friction entre particules et des interactions électrostatiques au-delà du niveau linéaire, ainsi que l'étude des interactions hydrodynamiques ou d'événements rares comme la nucléation.

Les physiciens et physiciennes étant volontiers sceptiques envers l'utilisation de boîtes noires, l'accueil initial de l'IA/ML était teinté d'un certain niveau de défiance, mais celui-ci s'est considérablement atténué ces derniers temps. Une des raisons provient des efforts fournis pour formaliser les problèmes d'IA à l'aide de la mécanique statistique. Ainsi, le modèle de Hopfield, l'un des premiers modèles de réseaux neuronaux, est une variante de celui d'Ising. La communauté de physique statistique devra continuer à apporter son point de vue unique sur le ML et contribuer à la fertilisation croisée entre ces deux domaines.

Science des matériaux

Sous l'impulsion notamment des enjeux climatiques, la recherche de nouveaux matériaux performants et respectueux de l'environnement s'appuie sur le calcul numérique, qui fournit des informations et des prédictions inaccessibles à l'expérimentation. Cependant, la science computationnelle des matériaux (CMS) doit être perçue comme une partie intégrante de la recherche fondamentale. Plusieurs directions prometteuses se dégagent en CMS, portées par les avancées méthodologiques en physique statistique et *ab initio* ainsi que par des approches spécifiques aux phénomènes étudiés, et ce domaine mérite d'être développé.

Les matériaux complexes, comme les hétérostructures, les matériaux multiphasés ou les empilements de matériaux bidimensionnels, nécessitent une modélisation précise et réaliste (défauts, interfaces et désordre) afin d'exploiter leurs propriétés prometteuses. À l'avenir, le potentiel des calculs *brute force* sur de grands systèmes permettra d'étudier par ex. de nouveaux mécanismes de recombinaison de dislocations, de formation de domaines structuraux ou magnétiques ou encore la propagation d'excitations spécifiques. En parallèle, la simplification des calculs (par ex., avec des bases localisées, liaisons fortes basées sur la DFT, etc.) et les nouveaux algorithmes pour les méthodes *ab initio* DFT et MBPT (par ex. stochastiques) permettront une description plus réaliste des effets dus à l'interaction coulombienne et à la complexité structurale.



Qubit réalisé à l'aide d'un logiciel 3D. © Sylvain BERTAINA / IM2NP / LASIRE / FSU / CNRS Images

La modélisation des matériaux *operando*, qui tient compte des conditions expérimentales (environnement, température, pression) ou des transformations en cours d'utilisation (par ex. lors des transitions stockage/déstockage dans les batteries), est en plein essor. Les défis incluent la description de transitions à différentes échelles et des phénomènes hors équilibre. En particulier, l'échantillonnage efficace du paysage de configurations complexe pour le calcul de l'énergie libre nécessite le développement de méthodes avancées de physique statistique couplées à l'IA/ML.

Les méthodes de **machine learning** promettent de nombreuses avancées. Par exemple, en métadynamique, elles peuvent permettre la détermination automatique de

variables collectives à l'aide de modèles basés sur les auto-encodeurs ou les machines à vecteurs de support. En MD *ab initio*, elles permettent d'accélérer les simulations en évaluant les forces atomiques à partir d'un potentiel ML ré-ajusté en temps réel sur une base de données DFT (**active learning**). Des simulations de plusieurs dizaines de milliers d'atomes deviennent envisageables avec une précision *ab initio*. Enfin, la conception inverse (**inverse design**) utilise des outils comme les réseaux neuronaux en graphes équivariants (EGNN) pour proposer de nouveaux matériaux en ciblant spécifiquement des propriétés particulières, s'affranchissant de l'approche traditionnelle par essai-erreur.

Le déploiement et l'utilisation à grande échelle de bases

de données regroupant des données structurales et fonctionnelles des matériaux sont indispensables pour éviter la duplication des travaux, l'apprentissage et l'étude de matériaux plus complexes. Ces données, issues d'expériences et de modélisations et qui seront complétées à terme par des trajectoires de MD ou des spectres, doivent être dans un format normalisé et facilement accessibles. Le projet PEPR DIADEM vise à combler le retard de la France par rapport à des initiatives comme Materials Genome, NOMAD, OPTIMADE ou Materials Cloud, mais plusieurs points importants liés au *big data* restent ouverts.

INTERACTION LUMIÈRE INTENSE ET PLASMA

Les progrès récents des technologies laser permettent l'étude de mécanismes fondamentaux et d'applications jusque-là inexplorés, en reproduisant des conditions extrêmes de l'Univers. Les simulations sont indispensables pour comprendre ces nouveaux effets et pour préparer et interpréter les expériences, rendues difficiles par les très courtes échelles de temps et d'espace en jeu.

Les codes *particle-in-cell* (PIC) sont au cœur de la simulation des **accélérateurs plasma**. Ici, un premier défi est de reproduire fidèlement les résultats expérimentaux. Un autre est d'avoir un temps de restitution quasi immédiat pour aider au pilotage *operando* comme dans les accélérateurs conventionnels. Ces simulations sont très coûteuses : il faut développer des stratégies numériques et des modèles réduits pour optimiser le rapport qualité/coût. Pour les méthodes PIC, les pistes sont l'utilisation du *boosted frame*, le raffinement de maillage, le modèle d'enveloppe, la décomposition en modes azimutaux, la *merge* de particules, la réduction de domaine, les codes quasi-statiques, etc. Ces codes étant utilisés par d'autres communautés (plasmas spatiaux et astrophysiques), une collaboration large au-delà de CNRS Physique est souhaitable pour ces développements.

Les outils de simulation devront bénéficier d'apport théorique pour la conception de nouveaux modèles réduits ainsi que pour l'inclusion d'effets physiques issus de l'électrodynamique quantique (QED) ou de la physique nucléaire. Le ML peut être utilisé pour permettre l'économie de simulations, le post-traitement de grands jeux de données dont l'acquisition pourrait aussi être optimisée et enfin pour concevoir voire piloter un accélérateur plasma.

Les lasers ultra-haute intensité permettent désormais d'explorer des régimes et effets d'**électrodynamique quantique** en champ fort (SFQED) comme l'émission de photons gamma de très haute énergie, la diffusion Thomson non-linéaire ou la production de paires électrons/positrons, notamment grâce à la potentielle interaction des champs lasers intenses avec un plasma. De même, les **lasers à électrons libres** (FEL) ouvrent des enjeux fondamentaux (physique des plasmas, matière) et applicatifs (médicaux) importants dans un avenir proche. Un défi

numérique est adossé à ces thématiques, qui nécessite la présence de numériciennes et numériciens laser-plasma et particulièrement d'experts et expertes aux interfaces simulation hautes performances.

Les résultats encourageants obtenus sur l'installation NIF aux USA à l'aide de lasers multi-kJ ouvrent enfin de nouvelles **perspectives énergétiques pour la fusion inertielle**. En France, le CEA/DAM dispose de codes hydrodynamiques nécessaires à la conception de futures expériences qui seraient aussi utiles à d'autres communautés qui étudient des cibles plasmas, et dont pourraient bénéficier les autres chercheurs.

HAUTES ÉNERGIES

Les activités en physique des **astroparticules** s'appuient sur des données issues d'observations de l'Univers. Les simulations sont cruciales pour accroître le volume de données nécessaire à l'entraînement robuste de l'IA employée pour reconnaître les événements. Les codes de dynamique de champs dans un contexte cosmologique sont à **l'interface entre physique des particules et cosmologie**, dans le cadre d'une théorie de champ moyen avec couplage aux fluctuations de la métrique et tenant compte des effets de rétroaction. Les calculs théoriques au-delà du régime linéaire sont attendus pour comprendre la **physique des grandes structures de l'Univers**, observées par LSST et Euclid. On anticipe des résultats expérimentaux très précis alors que les simulations à *N*-corps sont problématiques : coûteuses (notamment à cause du nombre de valeurs des paramètres d'entrée), encodage ambigu des effets non-linéaires entre diverses simulations, effets importants de discrétisation pour la simulation de systèmes massifs comparés à ceux de la matière noire. Pour toutes ces études, la communauté de physique des particules est bien structurée, mais des efforts sont nécessaires à l'interface avec la cosmologie, notamment en ce qui concerne l'extraction et l'interprétation des données.

Les activités en physique de la **gravitation** portent sur la relativité numérique et la résolution de l'équation d'Einstein pour divers systèmes physiques, par exemple le problème à deux corps en interaction gravitationnelle appliqué à la fusion de deux trous noirs, y compris dans le contexte des théories de la gravité modifiée. Les étoiles à neutrons et les supernovae sont étudiées en hydrodynamique relativiste. **La détection des ondes gravitationnelles** (OG) issues de ces corps et leur modélisation contraignent le diagramme de phase de la QCD, nécessitant toutefois des données fiables sur les taux de réaction nucléaires. Les défis numériques proviennent du caractère non linéaire de l'équation d'Einstein pour laquelle il existe des solutions avec des modes instables ou ne vérifiant pas les contraintes de jauge. Les problèmes avec une source non compacte sont encore complexes à résoudre. Grâce à son expertise des méthodes spectrales, la communauté va fortement s'investir dans l'analyse et l'interprétation des données d'OG recueillies par Virgo et

le projet Einstein Telescope, convoluant l'analyse avec les données existantes en nombre plus modeste. L'IA sera un outil précieux à condition de disposer de suffisamment de trames d'OG pour l'entraînement. L'espace des paramètres (masse, spin, taux de réactions nucléaires) étant vaste, le défi sera d'optimiser ce nouveau type de simulation par des efforts sur le parallélisme et les algorithmes.

Les activités en **physique des collisionneurs** seront guidées par les expériences présentes en 2030, avec des objectifs allant de la recherche directe de nouvelle physique à l'établissement des contraintes de la physique des particules sur l'Univers primordial et son évolution. Les efforts à venir porteront sur **le calcul d'intégrales multiples pour les corrections quantiques à deux boucles**, en tenant compte des masses finies des particules virtuelles. Ici l'IA pourra guider la paramétrisation analytique de ces intégrales. Un autre défi dans les approches perturbatives provient d'instabilités numériques se traduisant par des sections efficaces négatives. L'enjeu des simulations Monte-Carlo sera **la prise en compte de processus plus complexes**: davantage de particules dans l'état final, imbrication entre corrections électrofaibles à des processus forts et corrections fortes à des processus électrofaibles dans le cas de diagrammes à l'arbre, divergences issues de corrections électrofaibles en SMEFT (*standard model effective field theory*). En physique des ions lourds, les futures simulations auront pour ambition **l'examen des corrélations entre observables**, impliquant la montée en gamme des analyses de données. Enfin la résolution des EDP dans le régime non linéaire, qui gouvernent la dynamique des modèles bi-dimensionnels de QCD dans son régime de saturation, sera là aussi un défi numérique majeur.

Les activités en **théorie quantique des champs** concernent les simulations *ab initio* de la physique nucléaire et, en physique des particules, l'étude de l'interaction forte dans son régime non-perturbatif. Les équipes de QCD sur réseau cherchent à réduire l'incertitude théorique sur les éléments de matrice hadroniques qui paramètrent des processus intéressants en phénoménologie, notamment en physique du méson B ou du muon. Un effort portera sur **la tomographie 3D du hadron**, impliquant la résolution d'un problème inverse. La fonction spectrale est clef dans l'étude **des processus inclusifs**: il faut alors considérer dans les simulations la limite de volume infini avant la limite du continu. **Les systèmes physiques à potentiel chimique non nul** souffrent d'un problème de signe sévère, et des alternatives aux simulations Monte-Carlo devront être explorées (par ex. réseaux de tenseurs ou calcul quantique). Enfin l'IA générative sera utile pour l'échantillonnage Monte-Carlo de théories des champs conformes ou de modèles de matière noire composites.

THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES COMMUNES À PLUSIEURS CHAMPS DISCIPLINAIRES

Certaines avancées méthodologiques transcendent le découpage de la physique par domaines et les disciplines scientifiques en général.

La modélisation multi-échelle (ME) a été unanimement identifiée comme un défi où le ML peut être disruptif, après de nombreuses années de stagnation. Il est désormais envisageable d'intégrer de manière dynamique différents niveaux de modélisation à différentes échelles de temps et d'espace. Dans le domaine temporel, différentes hiérarchies de l'équation de Langevin généralisée sont explorées pour obtenir une granularité plus grossière, mais cela reste à améliorer. En matière condensée, les processus atomistiques et mésoscopiques pourraient être traités dans un même modèle grâce à une adaptation en temps réel de l'échelle. En physique des plasmas, des couplages entre descriptions fluide pour les grandes échelles et cinétique pour les petites permettront l'étude par ex. des interactions Soleil-Terre. Les simulations en astroparticules, couplant les champs de particules aux fluctuations de la métrique, doivent prendre en compte des phénomènes aux petites et grandes échelles. En matière molle ou biologique, les succès jusque-là limités de l'approche ME pourront être amplifiés par le ML, avec par exemple une application potentielle pour les systèmes biomoléculaires complexes permettant l'intégration de descriptions atomistiques détaillées avec des effets macroscopiques comme le comportement de phase. En mécanique des matériaux, les méthodes couramment utilisées au niveau mésoscopique permettent déjà de prédire les évolutions microstructurales dans des systèmes complexes (champs de phase) ou la déformation plastique des matériaux cristallins en étudiant l'évolution d'un ensemble de dislocations dans le temps (*discrete dislocation dynamics* ou DDD). Un couplage efficace entre les différentes approches (atomistique, champs de phase, DDD) à différentes échelles permettrait de décrire des phénomènes complexes tels que la propagation ductile des fissures, y compris la génération et la recombinaison de dislocations à la pointe de la fissure, ainsi que les phénomènes de fatigue. Tous ces exemples montrent l'intérêt d'une approche intégrative et structurée sur les approches ME.

Analyses des données en temps réel: la croissance du volume de données générées par les simulations et les expériences, dans des délais de plus en plus restreints, est devenue récemment exponentielle, eu égard notamment aux mises à niveau de certains grands équipements tels que l'ESRF. La gestion efficace de ces données représente un défi majeur, particulièrement en conditions operando. Elle nécessite le développement d'outils d'analyse en temps réel permettant de sélectionner des données, guider les expériences, et détecter des phénomènes intéressants. Par ailleurs, les questions du stockage et du partage de ce volume extrême de données deviennent critiques dans plusieurs domaines.

Interdisciplinarité: les avancées en physique numérique auront des répercussions dans de nombreux domaines au-delà du périmètre de la physique: chimie, biologie, géologie, ingénierie, etc. La capacité d'étudier des millions d'atomes avec une précision suffisante permettra des avancées sur les batteries, la photosynthèse, le

photovoltaïque, la dénaturation de l'ADN par les UV, les poussières interstellaires, pour ne citer que quelques exemples. En retour, les méthodes utilisées par les numériciennes et numériciens de CNRS Physique bénéficient des progrès effectués en chimie quantique ou en physique nucléaire. Deux interfaces sont particulièrement cruciales pour les développements :

— **L'interface avec les mathématiques appliquées** est très bénéfique, mais reste à développer dans de nombreux domaines de la physique numérique. Plusieurs progrès algorithmiques rendus possibles par des développements mathématiques sont à prévoir, au-delà du ML. Un exemple est d'exploiter la structure des problèmes ou des données pour compresser ou exploiter l'information physique, comme la décomposition interpolative pour compresser les fonctions de Green ou l'acquisition comprimée pour la tomographie. Un autre impact important à venir provient des méthodes permettant une estimation systématique et rigoureuse des erreurs issues de différentes sources, notamment pour mieux certifier les données avec application dans les bases de données utilisées en IA. Ceci permettra de rendre les calculs plus prédictifs et moins coûteux. Une autre convergence est celle du développement de nouvelles approches stochastiques et d'inférence bayésienne pour améliorer l'échantillonnage statistique, simuler des événements rares et accélérer les méthodes numériques (MC, MD). De manière générale, la communauté française est bien armée grâce à la présence d'expertes et experts en différents champs des mathématiques appliquées, statistique/probabilités, etc., mais l'interface avec la physique numérique manque de structuration :

— **Interface avec l'informatique.** L'informatique est le socle de la physique numérique et un dialogue permanent entre ces deux disciplines est naturel. Les nouveaux modèles de programmation tels que Kokkos pourraient résoudre bon nombre de problématiques de portabilité. Des techniques de génie logiciel et des méthodes formelles peuvent aider à optimiser, maintenir et valider les codes dépassant une taille critique et devenus difficilement gérables par de la simple expertise métier à caractère local. Une autre thématique active à cette interface est l'informatique quantique, où les paradigmes de programmation sont revisités pour exploiter les propriétés de la mécanique quantique, mais aussi tenir compte des contraintes imposées par les implémentations physiques des calculateurs quantiques (notamment NISQ). Un des enjeux à venir pour cette communauté déjà structurée est la création d'algorithmes hybrides. Enfin, le thème majeur de l'utilisation de l'IA/ML en physique numérique s'inscrit naturellement dans cette interface et est discuté ci-après.

THÈMES GÉNÉRAUX

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET MACHINE LEARNING

Dans les années à venir, les **techniques d'IA/ML** seront largement appliquées en physique, bouleversant notre

approche de la physique numérique tant au niveau des méthodes que de leur programmation. Plus spécifiquement, les techniques de ML deviennent standard dans le traitement de données (en premier les images) simulées ou expérimentales ou la génération et l'optimisation de codes. Les méthodes pertinentes sont celles intégrant des informations physiques (*physically informed ML*), permettant l'interprétabilité, et les méthodes génératives comme les auto-encodeurs variationnels ou les modèles de langage de grande taille (*large langage model*, LLM). Parallèlement, des outils spécifiques d'analyse numérique comme la différentiation automatique et l'arithmétique des intervalles (pour la quantification des incertitudes) gagnent en importance. Par ailleurs, l'optimisation des réseaux neuronaux en explorant le paysage de la fonction de coût est un processus étudié par les méthodes de la physique statistique, et les physiciens et physiciennes peuvent aussi contribuer au développement de nouvelles approches en ML en collaboration avec des spécialistes du domaine.

Les structures nationales ou régionales telles que AISSAI (CNRS), ISDM (Université de Montpellier), SCAI (Sorbonne Université), IRT Saint Exupéry (Toulouse), les Instituts interdisciplinaires d'intelligence artificielle (3IA) et les groupements de recherche tels que IAMAT ainsi que la MITI du CNRS favorisent ce type de collaborations, mais leur visibilité doit être améliorée. **Il reste pour cela des défis à relever**, tels qu'établir un langage commun entre physiciennes et physiciens et spécialistes de l'IA, favoriser la collaboration avec les acteurs privés pour influencer l'utilisation des ressources matérielles et des développements algorithmiques, rapprocher des communautés travaillant sur les approches basées sur les données (par exemple en astrophysique ou en sciences des matériaux) de celles travaillant sur les approches de principe (reformulation des problèmes physiques ou des algorithmes existants comme des problèmes d'optimisation traitables par ML).

Les aspects de **formation en IA/ML** recouvrent plusieurs dimensions. À l'horizon 2030, **il est fondamental que tous les étudiants en sciences bénéficient d'une formation de base en IA/ML**, au-delà d'une simple utilisation de ces outils comme une boîte noire. Par ailleurs, les difficultés rencontrées par certains physiciennes et physiciens expérimentés pour franchir le pas en IA/ML doivent être jugulées. L'échange de connaissances et la collaboration entre seniors et jeunes talents de l'IA en physique doivent se développer.

Globalement enthousiastes envers les avancées permises par le ML au-delà des effets de mode, les numériciennes et numériciens souhaitent aussi alerter sur **ses limites, dangers et défis**. La **fiabilité des résultats** est une préoccupation majeure, nécessitant une maîtrise complète du processus d'apprentissage automatique, de la création de la base de données à la validation des résultats. La collaboration avec des mathématiciens et mathématiciennes joue un rôle crucial ici. La **durabilité des outils** est

également une question : étant donnée l'évolution rapide en IA/ML, il est important de garantir la pérennité des outils développés. Il faut aussi trouver un équilibre entre avantages globaux offerts par l'IA/ML et ressources qu'il exige, en comparaison avec les approches conventionnelles. Il est ici crucial de faire prévaloir la bonne pratique de pré-évaluation du **rapport intérêt de l'utilisation du modèle vs investissement requis pour sa construction**. Les recherches sur les approches frugales en ML pour la physique, comme l'apprentissage à partir d'un petit jeu de données ou la généralisation, sont à fortement encourager.

ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIÉTAUX

Les impacts environnementaux du numérique sont multiples, très importants et en croissance très rapide. Pour les gaz à effet de serre, le niveau d'émission du numérique se situait à peu près à hauteur du trafic aérien mondial en 2021 et est en croissance de 6 % par an. Le numérique a d'autres impacts négatifs forts sur l'environnement de par son utilisation de très nombreux métaux. Pour des recommandations concrètes, nous renvoyons au chapitre *Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en physique*.

En physique numérique, les femmes représentent moins de 10 % des effectifs concernés à CNRS Physique. Une hypothèse est que la discipline souffre d'une image dégradée auprès des femmes par effet cumulatif de ce que

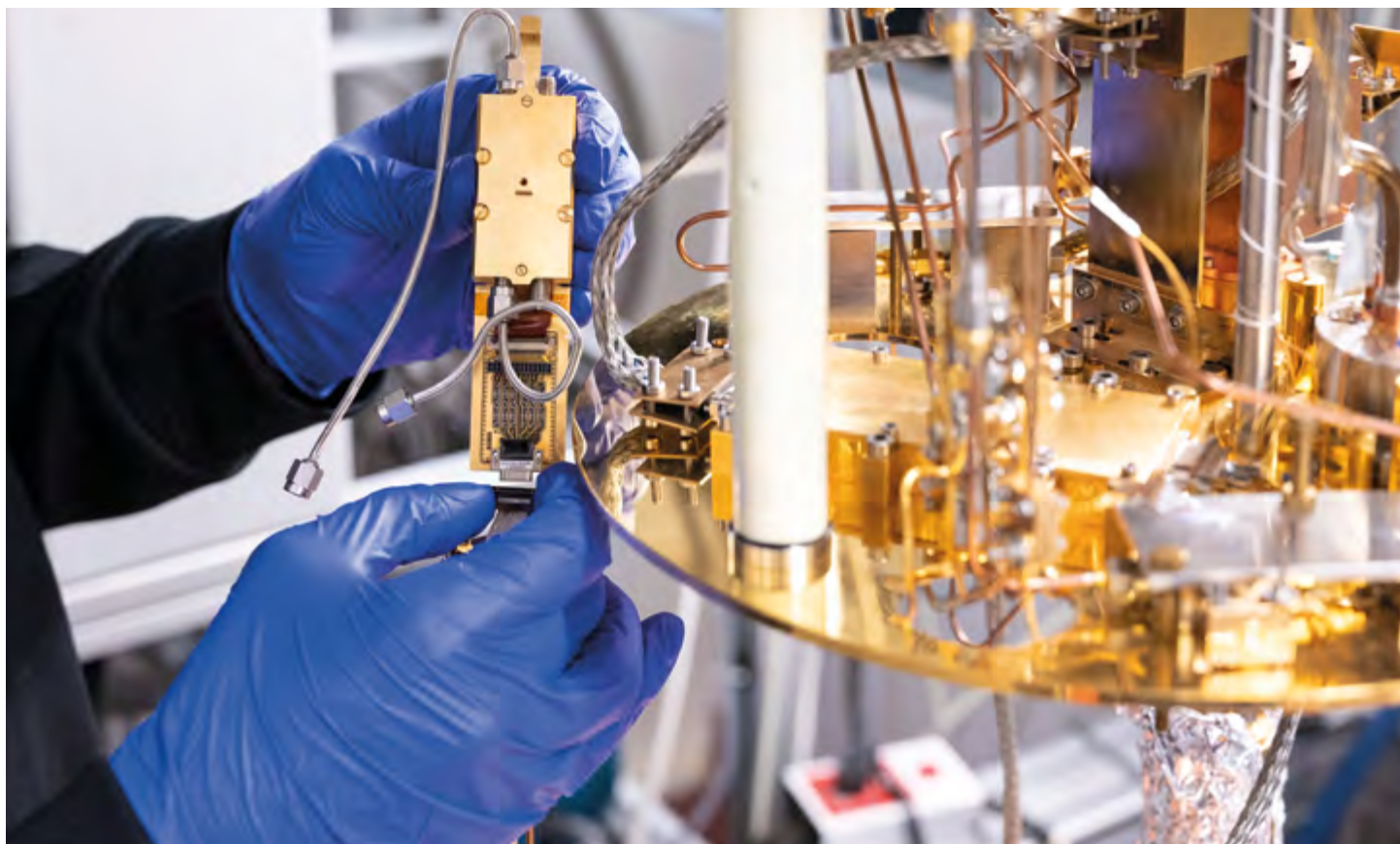
véhiculent la physique et l'informatique. Le déséquilibre semble moins fort en physique numérique sur les thèmes appliqués ou émergents comme l'IA. Ces constatations empiriques requièrent une attention particulière, peut-être plus encore que dans d'autres domaines de la physique.

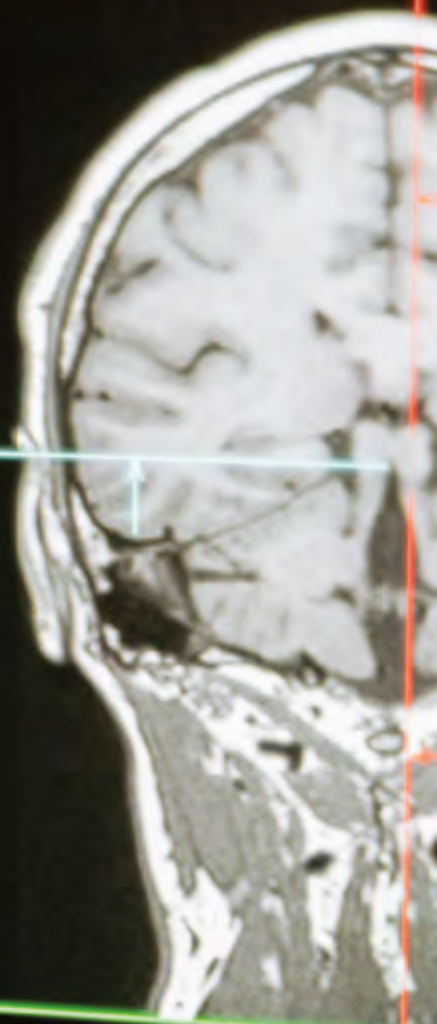
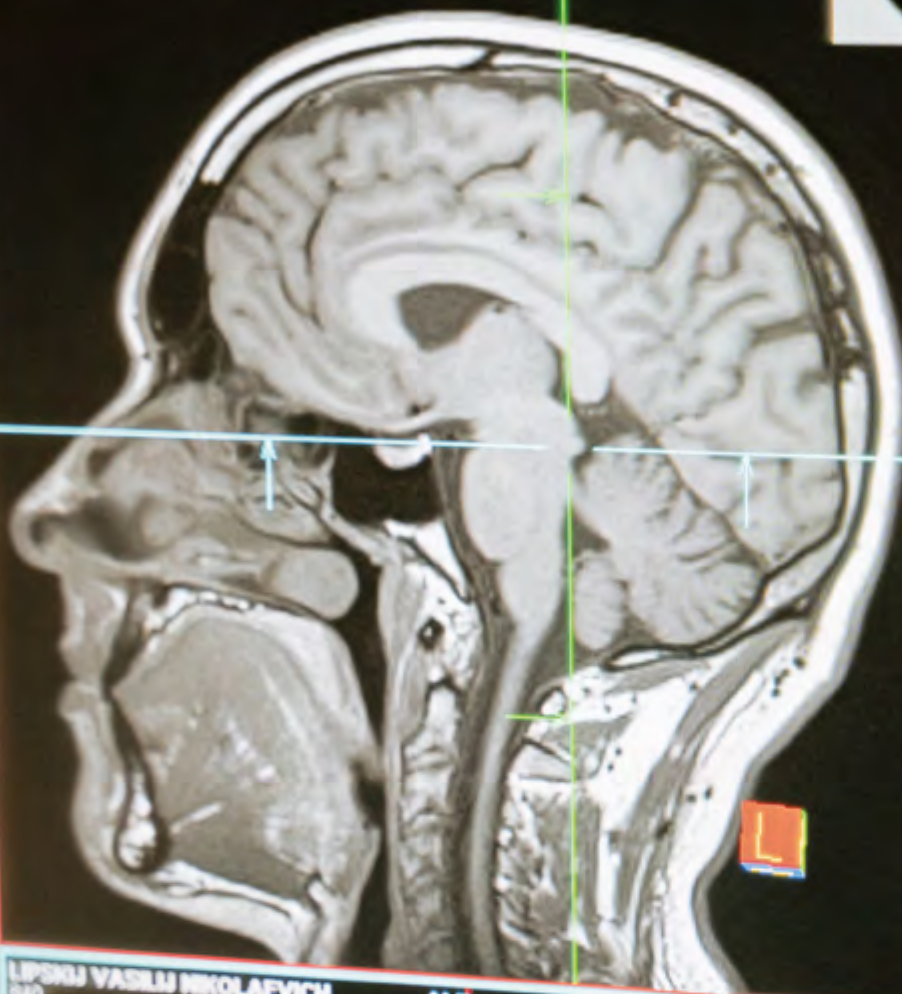
ENSEIGNEMENT ET FORMATION

La physique numérique est bien consolidée comme troisième pilier (entre physiques théorique et expérimentale) en recherche, mais le constat général est que ce n'est pas le cas au niveau de la formation des physiciens et physiciennes. Ce décalage a été accentué par la révolution récente, insufflée par les méthodes de l'IA/ML, encore peu enseignées. Trois aspects clés ont été identifiés comme essentiels à la formation moderne en physique.

(I) **La culture numérique**: concepts fondamentaux de l'informatique tels que systèmes d'exploitation, processeurs, hiérarchie de la mémoire, débogage, profilage, compilation ainsi qu'une connaissance de base des environnements de programmation et systèmes d'exploitation; (II) **en programmation générale**: connaissance pratique de base d'un langage de haut niveau (par ex. Python) et d'un langage de bas niveau (par exemple, C/C++); (III) **en physique numérique**: boîte à outils complète de méthodes numériques et algorithmes essentiels pour tout physicien et physicienne. Ces différents thèmes devront être repris dans le cadre d'écoles ou de formations des chercheurs pour ceux qui ne les ont pas appris durant leurs études.

Connection d'une puce à un cryostat. © Hubert RAGUET / C12 Quantum Electronics / LPENS / CNRS Images

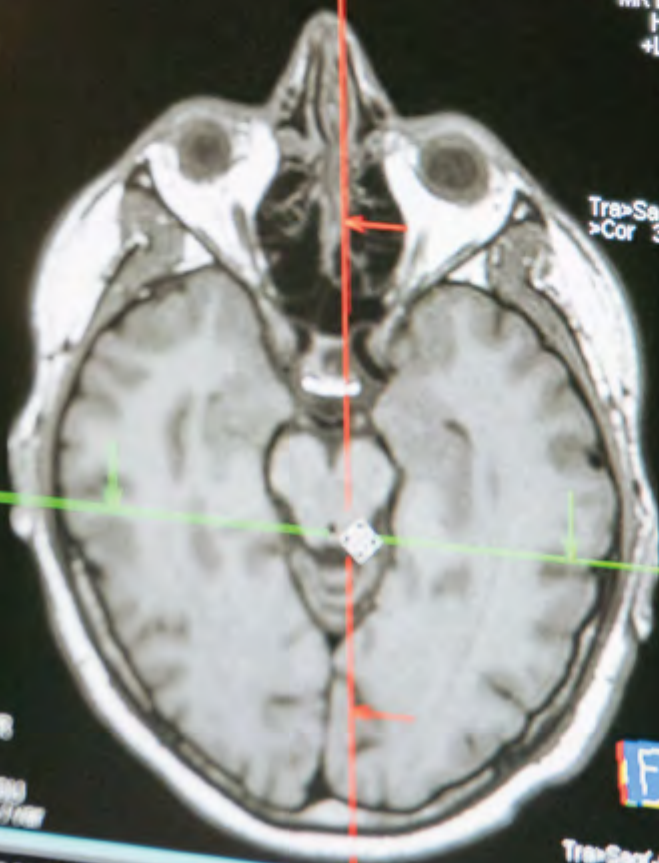




LIPSON VASILY NIKOLAEVICH
840
05.02.1991, M, 30Y
STUDY 1
26.02.2021
16:53:37
12 MAR 5

Hospital
MAGNETOM_ESSENZA
MR E11
HFS
+LPH
→

Tr>Sag -5
>Cor 3



TP 0
SP F3.1
SL 1.01
Tr>Sag(-5.4)>Cor(2.7)
W 625
C 297

Physique pour la santé

RÉSUMÉ

Les applications médicales découlant de recherches fondamentales en physique sont déjà nombreuses et diversifiées. Pour n'en citer qu'un nombre restreint, l'imagerie médicale moderne et les techniques de thérapie non invasives reposent sur les découvertes passées en physique des rayonnements et en physique des ondes. Dans cette optique, les recherches fondamentales d'aujourd'hui vont logiquement mener au développement des applications médicales de demain, et les découvertes actuelles les plus fondamentales en physique de la matière, en capteurs de nouvelle génération, en métamatériaux ou encore en mise en forme de fronts d'ondes vont très probablement conduire à des dispositifs médicaux et de nouvelles pratiques médicales allant bien au-delà de ce que l'on peut aujourd'hui imaginer.

Au risque de passer à côté d'une révolution à venir, il est toutefois possible dans le cadre de cette prospective de mettre en avant certains domaines de recherches en physique particulièrement prometteurs. Il est déjà possible de lister, par exemple, le développement de capteurs ultra-sensibles, ou de nouveaux dispositifs d'imagerie et de thérapie (qu'il s'agisse de délivrance d'agents thérapeutiques ciblés physiquement ou d'action physique directe par interactions onde matière pour détruire à distance des tissus pathologiques ou pour stimuler les systèmes nerveux centraux ou périphériques). Les domaines de la physique sont aussi variés que les applications potentielles, mais deux axes transverses majeurs peuvent d'ores et déjà être mis en évidence : le développement de systèmes portables et ultraportables et la limitation de l'impact environnemental des pratiques de soins. Le développement de systèmes portables permettra non seulement un déploiement plus aisé, en particulier dans les déserts médicaux, mais également une prise en charge plus rapide et plus efficace en les intégrant dans les véhicules d'intervention. L'impact environnemental des pratiques de soins ne peut plus être ignoré, que ce soit au niveau de la quantité de matériel médical à usage unique, que de la fabrication et du conditionnement des médicaments. La physique des matériaux, la modélisation, entre autres, ont un rôle majeur à jouer dans la diminution et le traitement des déchets, et dans la limitation de l'impact environnemental des médicaments.

Il est indéniable que l'intelligence artificielle aura un rôle majeur à jouer dans la santé de demain, depuis la prévention jusqu'au diagnostic et au traitement. Le gouvernement français et les organismes de recherche

l'ont bien cerné et l'ont déjà intégré dans des programmes de recherche ambitieux. Il est donc possible de prendre le parti d'acter cette tendance déjà bien établie à laquelle vont participer les physiciennes et physiciens de toutes disciplines et se concentrer sur les autres innovations qui seront susceptibles d'émerger en santé et qui pourront soit se développer indépendamment de l'intelligence artificielle, soit en bénéficier, soit encore la nourrir par l'apport de nouvelles sources de données de santé.

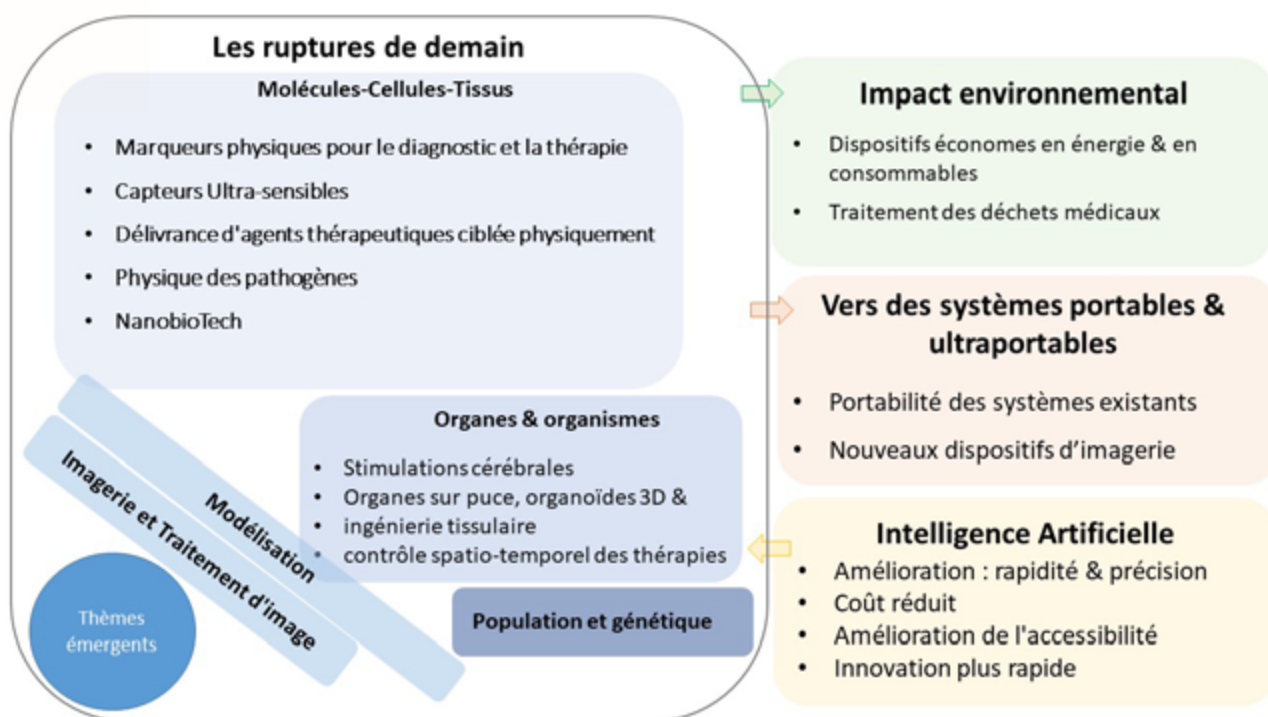


Figure 1 : Vue d'ensemble des champs d'innovation actuels et émergents dans le domaine de la physique pour la santé.

Physique pour la santé

INTRODUCTION

De nombreuses applications médicales découlant de recherches fondamentales en physique sont maintenant utilisées en routine clinique, comme la radiothérapie ou l'imagerie par résonance magnétique. Les recherches fondamentales d'aujourd'hui, y compris les progrès en biophysique, vont logiquement mener au développement des dispositifs médicaux de demain et conduire à de nouvelles pratiques médicales allant bien au-delà de ce que l'on peut aujourd'hui imaginer. Les laboratoires de physique, en France, sont actuellement à l'avant-garde des découvertes et des innovations qui en seront potentiellement à l'origine. Certains développements seront incrémentaux et prédictibles. Cependant, afin de ne fixer aucune limite aux impacts potentiels de la physique à la santé de demain, il convient de soutenir tous les domaines fondamentaux tout en mettant en place une veille scientifique capable d'identifier au plus tôt les découvertes ayant un potentiel de transfert vers la médecine et d'encourager les équipes de recherches à concrétiser leurs idées dans des preuves de concept préclinique et clinique. Au risque de passer à côté de quelques-unes des révolutions à venir, nous proposons ici de mettre en avant certains domaines de recherche en physique qui aujourd'hui semblent particulièrement prometteurs pour la médecine de demain, à la fois pour une modélisation plus fine des processus pathologiques et des épidémies, pour un diagnostic plus précoce, et pour des thérapies personnalisées, plus précises et mieux contrôlées. Bien que les domaines de la physique soient aussi variés que les applications potentielles, deux axes transverses se dessinent : le développement de systèmes portables et ultraportables et la limitation de l'impact environnemental des pratiques de soins (Fig. 1 ci-contre).

Il est indéniable que **l'intelligence artificielle** aura un rôle majeur à jouer dans la santé de demain, depuis la prévention jusqu'au diagnostic et au traitement. Le gouvernement français et les organismes de recherche l'ont déjà intégré dans des programmes de recherche ambitieux. Le parti est ici d'acter cette tendance et de se concentrer sur les autres innovations qui seront susceptibles d'émerger en santé et qui pourront soit se développer indépendamment de l'intelligence artificielle, soit en bénéficier, soit encore la nourrir par l'apport de nouvelles sources de données de santé.

DOMAINES DANS LESQUELS LA PHYSIQUE A UN FORT POTENTIEL DE RUPTURE EN SANTÉ

IMAGERIE BIOMÉDICALE NON-INVASIVE À L'ÉCHELLE DE L'ORGANE ET DE L'ORGANISME

Les techniques d'imagerie non invasives sont devenues des outils incontournables dans le domaine du diagnostic, du suivi thérapeutique des patients et du guidage des thérapies. Les techniques couramment utilisées en radiologie comprennent la radiographie, la tomographie par rayons X, l'échographie, la tomographie par émission de positons (TEP), la scintigraphie et l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Bien que ces techniques soient considérées comme matures, de nouveaux concepts, instruments et utilisations sont régulièrement développés.

Les enjeux et défis se tournent vers une imagerie plus précise (mieux résolue), plus quantitative, plus spécifique et moins invasive. Ces enjeux ne peuvent être dissociés de l'évolution vers des méthodes moins coûteuses et accessibles à tous. C'est dans ce contexte que la recherche fondamentale, en particulier dans le domaine de la physique de l'instrumentation, joue un rôle majeur. Par exemple, les développements en IRM prennent deux directions : d'un côté des systèmes transportables ou portables plus accessibles, et de l'autre des systèmes d'IRM à **haut champ et ultra-haut champ**, mieux résolus et utilisant des supraconducteurs sans refroidissement à l'hélium, un élément qui se raréfie et présente des coûts de plus en plus élevés. En parallèle se développe une approche innovante : l'imagerie par particules magnétiques (MPI), une technique non invasive qui permet de détecter dans les tissus la localisation et la concentration de nanoparticules d'oxyde de fer super-paramagnétiques en utilisant des champs magnétiques alternatifs. Outre son utilisation potentielle dans le domaine de l'imagerie ciblée au niveau moléculaire ou cellulaire (pour l'oncologie), la MPI présente un potentiel important en imagerie fonctionnelle du cerveau : elle a été utilisée pour détecter chez le rongeur l'augmentation du volume sanguin cérébral résultant de la neuro-activation. Les résolutions temporelles ont le potentiel d'être largement supérieures à celles de l'IRM fonctionnelle (IRMf). L'enjeu réside dans la construction de systèmes compatibles avec une utilisation chez l'homme et le couplage avec une méthode anatomique permettant une localisation spatiale précise du signal.

Dans le domaine de la **tomodensitométrie**, le développement de détecteurs à comptage photonique repousse les limites de résolution, de sensibilité et de spécificité des scanners actuels. En revanche, ces avancées ne pourront être probantes que si elles sont couplées avec le développement de sondes ultra-sensibles et plus spécifiques. Pour cela, les **nanotechnologies** ont un rôle essentiel à jouer afin d'imaginer des sondes **couplant diagnostic et thérapies** et générant un contraste modulable suivant leur rôle. Dans le domaine du **TEP**, le développement de **meilleurs détecteurs** reste un enjeu dans le domaine (semi-conducteurs, nouveaux matériaux, etc.).

Plus généralement, le **couplage de plusieurs techniques d'imagerie** non invasives (TEP-IRM) ou le couplage de techniques d'imagerie avec des dispositifs de **thérapie** (théranostique, thérapie guidée par imagerie) peuvent apparaître comme des recherches incrémentales, mais pourraient bénéficier de développements instrumentaux de rupture afin de bénéficier du meilleur des deux techniques.

Les nouveaux matériaux sont également une source importante d'innovation dans le domaine de l'imagerie biomédicale et de l'IRM pour améliorer la qualité d'émission et de réception du signal, qu'il s'agisse de céramiques, de métamatériaux, de méta-surfaces ou de diélectriques artificiels.

Ces développements peuvent également avoir pour but de faciliter la mise en place du patient dans l'IRM et, par conséquent, **améliorer l'accessibilité** à cette technique. On peut par exemple penser à des vêtements/combinaisons intégrant l'ensemble des capteurs nécessaires à l'IRM (antennes, capteurs ECG, respiration, etc.) qui, en plus d'améliorer le rapport signal sur bruit, pourront intégrer des informations utiles à la correction des artefacts de mouvement, à la synchronisation cardiaque, etc. L'enjeu est de combiner tous ces détecteurs sans qu'ils interagissent entre eux.

IMAGERIE OPTIQUE POUR LE DIAGNOSTIC AUX ÉCHELLES MOLÉCULAIRES, CELLULAIRES ET TISSULAIRES

Des marquages fluorescents, spécifiques et permettant une analyse multiplexée, sont couramment utilisés pour l'imagerie optique en recherche, mais sont difficiles à appliquer chez l'homme. C'est pourquoi des techniques d'imagerie microscopique sans marquage, détaillées ci-dessous, sont en développement. Il s'agit d'un domaine en pleine expansion et de nouvelles variantes et de nouveaux modes apparaissent régulièrement.

Approches basées sur l'interférence et la phase: les interférences, la diffraction et la réflexion/réfraction sont des propriétés fondamentales de la lumière qui peuvent être exploitées pour l'imagerie quantitative. Parmi les exemples, on peut citer la microscopie par contraste in-

terférentiel en réflexion (RICM) qui permet d'imager l'adhésion cellulaire avec une grande précision, l'imagerie interférométrique de diffusion (iSCATT) qui permet de suivre les petites particules, et la microscopie de phase qui permet d'imager finement les organites cellulaires. Le développement rapide de l'analyse de ces données ouvre la voie à leur utilisation dans le contexte médical à des fins de diagnostic.

La génération de seconde harmonique (SHG) et l'imagerie par Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS) reposent sur l'interaction non-linéaire de la lumière avec le matériel biologique. Ces techniques, comme la tomographie optique, ont trouvé des applications importantes, par exemple pour le diagnostic du cancer ou des défauts oculaires. La microscopie CARS peut être intégrée à un endoscope pour obtenir des images internes du corps.

La microscopie Brillouin combine la diffusion Brillouin avec la microscopie pour cartographier, au cours du temps, les propriétés mécaniques des tissus à l'échelle micrométrique. Elle peut contribuer à la détection précoce des maladies où la rigidité des tissus est altérée, comme le cancer ou les maladies cardiovasculaires. Elle possède un fort potentiel clinique par son potentiel à évaluer l'efficacité des traitements et à suivre l'évolution des maladies.

Outre la microscopie à 2 ou 3 photons, l'une des façons de contourner la limitation de la lumière de pénétrer en profondeur dans les tissus consiste à faire interagir les ondes optiques avec un autre type d'onde pouvant être focalisée en profondeur dans les tissus, comme une onde ultrasonore. C'est le principe de la *photoacoustique*, toutefois limitée par des caractéristiques physiques telles que la fréquence des ultrasons utilisés, la géométrie du détecteur et les propriétés acoustiques et d'absorption optique des tissus. Les défis restent nombreux, comme un champ de vue encore limité pour imager les organes larges ou la difficulté à imager des structures anatomiques présentant des mouvements (qu'ils soient d'origine respiratoire ou cardiaque).

La microscopie optique reste toutefois confrontée à des **défis**: l'imagerie d'éléments **de plus en plus petits**, à une **vitesse toujours plus grande**, et dans des conditions aussi proches que possible de la **physiologie**, y compris *in vivo* (éventuellement sur des animaux se déplaçant librement); la reconstruction en 3D, en profondeur et en temps réel, dans des conditions non-transparentes et diffusantes; la combinaison de différentes modalités de microscopie pour obtenir une image plus complète. La microscopie **multimodale** et la microscopie **corrélationnelle**, qui associent la détection optique à d'autres modalités telles que la microscopie électronique, font l'objet de recherches actives. Les approches d'apprentissage profond (*deep learning*) font des progrès particulièrement importants dans le domaine de l'imagerie. Outre la reconnaissance de motifs, le changement de modalité

basé sur l'apprentissage profond — par exemple, la génération d'une image super-résolue à partir d'une image d'épifluorescence ou d'une image similaire à la fluorescence à partir d'un mode non fluorescent — est un domaine en pleine expansion.

De plus, la microscopie optique telle que nous la connaissons est sur le point de connaître une révolution grâce à l'utilisation de méta-surfaces optiques, qui sont des réseaux bidimensionnels de nanostructures transparentes permettant de manipuler la lumière. Elles sont généralement plus minces et plus plates que les lentilles et peuvent combiner plusieurs fonctions optiques, éliminant ainsi le besoin de composants optiques encombrants et coûteux. L'optique plate est censée non seulement miniaturiser les microscopes à un niveau sans précédent, mais aussi ouvrir des applications jusqu'alors inimaginables.

Les physiciennes et les physiciens qui travaillent à l'interface de la biologie et de la physique sont en première ligne pour contribuer à l'ensemble de ces efforts.

MARQUEURS PHYSIQUES POUR LE DIAGNOSTIC

Les analyses biologiques sont des éléments incontournables du suivi des patients qui s'appuient sur des techniques de détection de marqueurs chimiques (ex. tests ELISA). Elles restent limitées par le fait qu'elles testent la présence d'une substance plutôt que la fonction des cellules. La détection de marqueurs physiques, en particulier des marqueurs **mécaniques** ou morphologiques (taille, forme), peut combler cette lacune. Depuis une trentaine d'années, les données biophysiques montrent que les cellules « mesurent » la mécanique de leur environnement en appliquant des forces et qu'elles réagissent à la mécanique de l'environnement. D'autre part, la mécanique des cellules elles-mêmes est influencée par leur physiopathologie. Ce fait même est utilisé pour la détection mécanique d'une multitude de maladies, notamment dans la tumorigenèse de différents types cellulaires. Ces techniques sont particulièrement adaptées aux cellules circulantes (par exemple pour des hémopathies malignes) ou des biofluides, mais elles peuvent également fonctionner sur des biopsies de tumeurs solides, voire à plus long terme sur des particules virales ou des vésicules/particules extracellulaires de type exosomes. L'espoir est de permettre une caractérisation plus précoce et plus précise qu'avec les techniques conventionnelles. Le principal obstacle, qui était auparavant le faible débit de la plupart des mesures mécaniques, est désormais surmonté par les techniques microfluidiques. Alors que la France est devenue un leader dans les applications biologiques de la microfluidique, les mesures mécaniques ou physiques à haut débit permettront une avancée majeure dans le domaine des analyses biologiques.

Un autre marqueur physique d'avenir est l'analyse des **dynamiques** des cellules et organites cellulaires. Un exemple actuellement développé est celui du battement des cils pulmonaires, où la thérapie régénérative est quan-

titativement accessible en utilisant une métrique d'activité définie mathématiquement, le formalisme étant souvent emprunté à la physique fondamentale. Si l'utilisation de marqueurs et de *read-out* physiques à l'échelle du tissu et de la cellule est désormais une réalité, ces marqueurs physiques de défauts et de maladies pourraient également être exploités à l'échelle subcellulaire, notamment grâce à de nouvelles techniques d'imagerie et des micro/nano-actuateurs (nanothermomètre optique, nanoparticules sensibles aux espèces réactives de l'oxygène).

MORPHOGENÈSE ET MÉDECINE RÉGÉNÉRATIVE

La compréhension de l'émergence de formes dans le vivant, particulièrement des organes, s'est avérée un courant important en physique (vasculogénèse, arbre pulmonaire, forme des membres...). Des analogies se sont révélées fécondes avec la physique de la matière condensée, de la matière dite active, de la matière molle ou des systèmes dynamiques. Parallèlement à des approches purement génétiques, la formation des organes peut s'expliquer pour tout ou partie par des **effets dynamiques d'origine physique** décrits par un champ de contrainte dont les termes diagonaux correspondent à des **pressions** (dont l'origine est métabolique, due principalement à des effets osmotiques) et les termes non-diagonaux à des **cisaillements** (dues à des contractions des tissus). Les pressions ont tendance à pousser les surfaces comme les épithéliums dans le sens de la croissance, par exemple dans le développement des organes tubulaires comme le poumon, le rein ou la vessie. De ces concepts découle que la stimulation exogène de forces et de contraintes est capable de causer des événements **morphogénétiques**. Le recours à des **forces physiques** en matière de développement tissulaire a une histoire ancienne en médecine. Aujourd'hui de nouveaux dispositifs sont développés, basés sur une compréhension plus fine des mécanismes de croissance, de développement et de régénération. Pour **stimuler** de façon efficace et non traumatique les tissus, différentes techniques sont envisagées comme la stimulation électrique (régénération, cicatrisation, réparation d'organes digestifs, neurones), la stimulation magnétique (croissance et réparation des os) ou les stimulations acoustiques basses fréquences ou ultra-sons (os, système digestif). La stimulation électrique agit sur les forces de contraction en déclenchant des ondes calcium qui ont un effet catalytique sur les têtes de myosine. Ces recherches pourraient aboutir à des dispositifs médicaux permettant de traiter de façon exogène des pathologies comme les membres ou organes atrophiés ou faibles chez des patients ou de pouvoir stimuler et renforcer des organes comme le poumon ou le rein pour les réparer. Ces techniques sont classées sur le plan réglementaire comme des dispositifs médicaux dont l'action est locale, ce qui permet d'éviter d'administrer des facteurs de croissance qui ont un impact global et un risque de formation de tumeurs. De plus, ces dispositifs utilisent des paramètres de contrôle connus, faciles à moduler avec des instruments électro-mécaniques classiques.



Croissance d'une colonie de levures. © Clément VULIN/CNRS Images

Néanmoins, les dispositifs proposés exercent des contraintes physiques par l'extérieur, à une échelle macroscopique, alors que le tissu se développe par l'exercice de contraintes à l'échelle microscopique. Des contractions sur les cellules stimulent la croissance d'un tissu par mécanotransduction comme l'activité sportive augmente la masse musculaire. Rien ne garantit cependant que l'exercice d'un champ externe épousera fidèlement la dynamique de croissance du système pour reproduire la croissance d'une façon physiologique. Un second obstacle de ces techniques est qu'elles doivent en général traverser les tissus avant d'atteindre leur cible, par exemple les bronchioles, avec de possibles effets indésirables au niveau de l'organe. Enfin, il reste à maîtriser l'espace des paramètres pour doser correctement l'amplitude des stimulations électriques, magnétiques ou acoustiques, le schéma de l'excitation et la forme et la position du stimulateur.

Des stimulations **plus microscopiques** sont également prometteuses avec pour cible intracellulaire la membrane du réticulum endoplasmique, les mitochondries ou le noyau, par exemple. La forme du noyau déformé influe sur la transcription, de sorte que des recherches ont lieu sur le couplage entre la transcription et les forces mécaniques. La **mécano-transduction** est cruciale dans la réussite des **thérapies cellulaires** et subcellulaires de toutes sortes, y compris la thérapie par les cellules souches et les immunothérapies. Les applications futures dans la médecine physique et la médecine du sport intégreront probablement une compréhension approfondie des liens encore inconnus entre **stimulation physique et métabolisme** apportée par les physiciens. Un enjeu majeur est également de faire face au **vieillissement** de la population par des mesures quantitatives et dynamiques et du comportement (par exemple l'analyse posturale ou l'analyse des trajectoires pour prévenir le risque de chute), du métabolisme énergétique ou encore de l'activité des systèmes nerveux, de leur analyse par IA et des

moyens physiques de les corriger en temps réel par des boucles de rétroactions.

STIMULATION CÉRÉBRALE NON INVASIVE

La stimulation cérébrale est un outil indispensable dans l'arsenal thérapeutique des psychiatres et des neurologues. Les nouvelles techniques de stimulation cérébrale comme la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) ou la stimulation transcrânienne à courant continu (tDCS) permettent désormais de moduler l'activité cérébrale sans nécessiter d'intervention chirurgicale, offrant ainsi des traitements potentiels pour un large éventail de troubles neurologiques et psychiatriques. Si l'efficacité de ces techniques, dictée par l'interaction des ondes avec les tissus neuronaux, peut être améliorée par des recherches en biophysique, leurs limites sont quant à elles imposées par les lois de la physique: le **champ électrique** rayonné par les électrodes transcutanées de la tDCS et le **champ électromagnétique** généré par les bobines des systèmes de TMS ont tous deux des longueurs d'ondes plus grandes que la taille d'une tête humaine. Les progrès des techniques de focalisation d'ondes dans les milieux complexes ont un rôle majeur à jouer pour leur permettre d'atteindre le Graal de la neurostimulation: la stimulation non invasive des structures cérébrales profondes avec une précision millimétrique. La France est à la pointe de la recherche dans ce domaine. Une approche originale qui contourne les limitations des ondes électromagnétiques consiste à utiliser des **ondes ultrasonores**. Cette approche bénéficie de deux découvertes récentes complémentaires: d'une part la capacité des ultrasons de faible intensité à déclencher des potentiels d'action, d'autre part la possibilité de mettre en forme les ondes ultrasonores pour focaliser en profondeur tout en corrigeant les aberrations induites par la boîte crânienne. Dans ce domaine, les apports potentiels de la **physique des ondes** restent immenses et les recherches doivent se poursuivre pour

améliorer encore la précision du ciblage et faciliter l'utilisation clinique avec des traitements personnalisés. L'utilisation de **lentilles acoustiques et de métamatériaux innovants** ont ici toute leur place.

L'optique n'est pas en reste dans le domaine de la neurostimulation. Avec une boîte à outils grandissante de rapporteurs et d'actionneurs **optogénétiques**, permettant à la fois l'exploration optique de l'activité neuronale et la génération de courants électriques transmembranaires pour l'activation et l'inhibition neuronales, l'utilisation de l'optique a permis d'immenses progrès dans l'ingénierie inverse des circuits neuronaux. Une révolution parallèle est en train de prendre forme pour mettre en œuvre tout le potentiel de ces outils dans les interfaces cerveau-machine optiques dédiées à l'interrogation des circuits neuronaux et la restauration de la vision. Plus précisément, de nouvelles technologies issues des travaux fondamentaux en photonique commencent à émerger pour permettre de lire et d'écrire dans les circuits neuronaux avec une résolution suffisante pour résoudre le potentiel d'action individuel d'une cellule unique dans un champ d'excitation de quelques millimètres, en profondeur et sur des animaux se déplaçant librement. L'optogénétique a déjà réalisé une percée importante dans la restauration de la vision à faible résolution chez l'homme, et l'amélioration de la technique nécessitera désormais des efforts concentrés sur des dispositifs compacts.

Dans le contexte des applications cliniques, il sera de plus en plus important de développer des technologies de rétroaction où la stimulation peut être rapidement adaptée à l'effet produit, que ce soit à partir d'approches optiques, ultrasonores, ou électromagnétiques.

DÉLIVRANCE D'AGENTS THÉRAPEUTIQUES CIBLÉE PHYSIQUEMENT ET CONTRÔLE SPATIO- TEMPOREL DES THÉRAPIES

L'un des verrous majeurs des thérapies actuelles est leur **manque de précision ou de spécificité** pour les cibles à traiter. Il en résulte un déficit d'efficacité et des effets secondaires souvent sévères qui conduisent à l'arrêt des traitements ou à l'émergence de phénomènes de résistance. Si la notion de cible thérapeutique est fréquemment associée à un complexe moléculaire plus ou moins spécifique, l'accès d'un médicament ou l'action thérapeutique d'un traitement (physique ou médicamenteux) se heurte à des barrières physiques à toutes les échelles : au niveau des tissus, au niveau cellulaire, puis au niveau intracellulaire. Une meilleure compréhension de ces barrières physiques, nouvellement considérées comme des cibles, est l'un des objectifs de la **mécano-biologie** évoquée plus haut et plus généralement des **thérapies physiques** qui visent à moduler temporairement ou non, localement ou non, ces barrières. Citons par exemple l'importance de la matrice extracellulaire, de son architecture et de ses propriétés mécaniques (rigidité, pression interstitielle...) pour l'infiltration d'anticorps thérapeutiques ou pour la pénétration de cellules immunitaires dans les tumeurs solides.

Ramollir les tumeurs pour les rendre plus accessibles aux anticorps d'immunothérapie, aux chimiothérapies plus classiques et aux thérapies cellulaires (*chimeric antigen receptor* — CAR T cell, CAR NK cell ...) est une stratégie qui émerge. Les mêmes concepts de **modulation de l'environnement physique** peuvent s'appliquer pour réduire les effets délétères de la fibrose ou encore pour favoriser la cicatrisation ou la régénération tissulaire. Une connaissance approfondie des interactions entre la structure dynamique de l'environnement extracellulaire, ses propriétés physiques et les capacités de transport actif ou passif d'agents thérapeutiques biologiques (biothérapies à base de cellules, vecteurs viraux, vésicules extracellulaires, anticorps...) ou synthétiques est nécessaire.

Un autre exemple de résistance d'origine physique est l'incapacité de certains agents biologiques ou de leurs vecteurs à être internalisés par les cellules et surtout à délivrer leur contenu dans le bon compartiment intracellulaire pour être actif. Citons la délivrance d'acides nucléiques à visée thérapeutique dans la cellule qui doit échapper au confinement endosomal pour atteindre le cytosol et permettre une thérapie génique. En plus des vecteurs viraux et des **vecteurs** synthétiques tels que les nanoparticules lipidiques (vaccins à ARNm), on assiste à l'émergence de vecteurs non viraux ou hybrides comme les vésicules/particules extracellulaires. La physique des membranes et de la matière molle - fusion, fission, dynamique, radeau, coacervat et ouverture de pores, compartimentation, interaction avec la matrice — est au cœur de ces phénomènes et peut aider à une **rationalisation** et une **optimisation** des (nano)systèmes de délivrance pour une meilleure efficacité, une réduction des doses, des coûts et de l'impact environnemental des procédés de production, ainsi qu'un contrôle accru de la réponse immunitaire.

Surmonter ces barrières physiques aux traitements, c'est d'abord les identifier et les comprendre, puis proposer des outils d'activation par une combinaison de stimuli internes ou externes de l'action thérapeutique : par exemple, ouvrir le passage d'agents thérapeutiques dans le cerveau en contrôlant physiquement la barrière hémato-encéphalique. L'activation par des champs extérieurs, de manière non invasive ou minimalement invasive via des endoscopes ou dispositifs implantables, montre des résultats encourageants, certaines technologies étant déjà en phase clinique : ultrasons, rayonnements ionisants, radiofréquence, plasmas froids, champs magnétiques alternatifs, rayonnements optiques dans les fenêtres de transparence des tissus, champs électriques pulsés pour l'électroporation ou l'électrochimiothérapie... Ces **stimuli physiques** diffèrent tant par leur capacité à pénétrer les tissus et à exercer une action ciblée spatialement (zone de focalisation) et/ou temporellement que par leurs modes d'action souvent multifactoriels et encore mal identifiés sur les structures biologiques. Une meilleure compréhension des interactions dynamiques entre les rayonnements et la matière biologique à toutes les échelles de temps et d'espace sera nécessaire. Par

exemple, les applications des plasmas froids (antibactériens, anticancéreux, régénératifs...), dont les sources peuvent être miniaturisées et appliquées par endoscopie, n'en sont encore qu'à leur début.

Pour augmenter encore la précision et l'efficacité, les stimulations physiques peuvent être amplifiées localement par des activateurs, souvent des nanoparticules, qui viennent relayer l'interaction entre le stimulus physique et la matière biologique : les nanoparticules plasmoniques ou absorbantes comme nanosources de chaleur ou photosensibilisateurs, les nanoparticules magnétiques déjà visibles par IRM ou MPI pour stimuler mécaniquement ou thermiquement leur environnement, des nanoparticules à numéro atomique élevé pour démultiplier les effets des radiothérapies (les nanoparticules d'hafnium et de gadolinium développées par des entreprises françaises sont en essai clinique comme radiosensibilisateurs chez l'homme...). Le potentiel de ces nanoparticules repose sur une connaissance plus poussée des interactions entre nanoparticules, rayonnement et milieu biologique. On peut espérer par l'utilisation de nanoparticules « activables » ouvrir des fenêtres thérapeutiques pour surmonter les résistances aux traitements dont les moyens d'action sont biologiques. Par exemple, la nanohyperthermie, en modulant thermiquement la matrice extracellulaire des tumeurs solides, peut permettre d'améliorer l'infiltration et l'accès aux cellules tumorales des cellules immunitaires cytotoxiques. Un des défis sera de savoir combiner de manière la plus optimale possible les différents traitements et de les étendre à d'autres types de pathologies que le cancer, comme par exemple les plaques d'athérosclérose ou la fibrose hépatique ou pulmonaire. Un autre défi pour ces traitements de précision vise à contrôler la réponse immunitaire, la physique pouvant apporter des concepts et des méthodes pour mieux comprendre et maîtriser la déclenchement (activation) de l'immunité.

Enfin, beaucoup de progrès sont attendus dans les modes d'administration des traitements et des nouvelles (bio)-thérapies. L'hydrodynamique, la physique non linéaire, la physique de la matière molle, si les liens avec les technologies médicales sont noués, devraient contribuer à l'optimisation des méthodes de délivrance locale, ciblée et contrôlée, comme par exemple les aérosols et les dispositifs d'administration de médicaments sous pression, telles que les micro- et nano-aiguilles, les biomatériaux de soutien et d'auto-réparation, les colles biologiques, les sutures, les stents...

Une stratégie intéressante est d'exploiter les stimuli internes à l'organisme et spécifiques à la pathologie, comme par exemple les zones de turbulence dans les vaisseaux sanguins ou l'augmentation de température dans les zones d'inflammation, pour activer la délivrance d'un principe actif sur ces cibles à partir d'un (nano)vecteur/capteur intelligent. L'avenir permettra probablement de combiner les réponses aux stimuli interne (donc personnalisé) et externe avec un contrôle en temps réel par

des capteurs et une rétroaction. En France, il semble que les chercheurs et les chercheuses dans ces domaines sont relativement bien connectés au monde médical pour permettre des applications cliniques et un transfert de technologie relativement rapides.

MÉDECINE PERSONNALISÉE : ORGANOÏDES, INGÉNIERIE TISSULAIRE ET CELLULES ARTIFICIELLES

Un défi majeur de la médecine consiste en l'hétérogénéité des patients. Alors même que chaque personne se définit par son histoire, son environnement, son matériel génétique, son comportement singulier, comment délivrer le bon traitement au bon patient au bon moment ? La possibilité d'une **thérapie personnalisée** s'est vue révolutionnée par les techniques d'imagerie et de suivi en temps réel de constantes biologiques déjà évoquées plus haut, mais également par l'émergence de tests de screening in vitro ou ex vivo sur les propres cellules du patient organisées ou non en tissu fonctionnel. Les cellules adultes prélevées sur le patient peuvent être déprogrammées en cellule immature de prolifération illimitée les cellules souches pluripotentes adultes ou IPS, puis reprogrammées pour donner n'importe quelles cellules de l'organisme. Ces cellules sont déjà largement utilisées pour modéliser de nombreuses pathologies humaines, pour tester l'efficacité et la toxicité de molécules potentiellement thérapeutiques ou pour des thérapies cellulaires. En parallèle de cette révolution de la biologie cellulaire et moléculaire, les progrès en **biophysique** et **microfluidique** ont permis de créer des **micro-architectures** avec propriétés **mécaniques** contrôlées, favorisant l'auto-organisation et/ou à l'impression de différents types de cellules en trois dimensions reproduisant au moins partiellement le développement et le fonctionnement de divers tissus biologiques. Ces organoïdes sur puce, ou en 3D, par exemple dans des capsules biodégradables, sont aujourd'hui de complexité croissante, intègrent différents capteurs miniaturisés et peuvent être mis en réseau pour étudier les interactions et échanges entre organes et leurs réponses à différentes drogues ou stimuli. La microélectronique embarquée, la création de microcanaux, l'utilisation de matériaux transparents pour faciliter le suivi temporel, le contrôle de l'environnement physique et chimique, vont permettre de reproduire l'environnement d'un organe, ses connexions et ses fonctionnalités (mécaniques, métaboliques...), dans des conditions physiologiques, mais aussi pathologiques, et cela sur les cellules mêmes du patient. À terme, la complexification des organes sur puces, mais aussi leur développement à l'échelle industrielle comme substituts de tissu humain permettront de faire progresser la compréhension des processus physiopathologiques, la recherche des biomarqueurs communs à des groupes de patients, cribler les candidats médicaments et les biothérapies, réaliser des tests de toxicité, réduire les coûts, les consommables et l'utilisation de l'expérimentation animale, et comprendre la réponse propre à chaque individu dans chaque situation testée. Il est

possible d'imaginer des essais cliniques sur puce si ces derniers peuvent également intégrer le fonctionnement immunitaire. L'apport du physicien, outre les aspects d'ingénierie et d'instrumentation, sera aussi de modéliser les comportements dans ces systèmes complexes à partir de caractérisations dynamiques multimodales, multiparamétriques et multi-échelles.

La maîtrise de la fabrication d'organoïdes servira aussi de base pour l'ingénierie tissulaire afin de concevoir des tissus personnalisés directement implantables dans l'organisme pour la médecine régénérative. Les organoïdes, fabriqués à grande échelle, pourront servir de nouveaux systèmes d'expression de biomédicaments tels que les vésicules extracellulaires.

Enfin, notons l'émergence de cellules artificielles ou synthétiques ou encore numériques qui reposent sur trois fonctions fondamentales : la compartimentation, le métabolisme ou l'autonomie énergétique et le contrôle de l'information. Le défi sera d'assembler ces fonctions pour construire des entités fonctionnelles capables de reproduire et corriger certaines fonctions cellulaires, ou encore de créer des entités qui non seulement s'auto-fabrique et fonctionnent de manière autonome, mais peuvent aussi s'adapter à leur environnement et acquérir de nouvelles fonctionnalités, reproduisant l'évolution adaptative. On imagine également des systèmes artificiels vivants hybrides embarquant par exemple des capteurs ou nanoparticules activables. Les applications en santé sont aussi nombreuses que futuristes, aussi bien dans le domaine des biothérapies injectables pour détecter et corriger certaines fonctions dans l'organisme (thérapies géniques, vaccins, délivrance de protéine, activation du métabolisme énergétique...) que des biotechnologies pour la stérilisation, la dépollution, etc.

ANALYSE DE MASSE ET DE PRÉCISION PAR LES NANOTECHNOLOGIES

Les nanotechnologies ont le potentiel de transformer les paradigmes biomédicaux des analyses de masse, des lectures moyennées et de l'administration de médicaments, en permettant la création de structures précises comparables en taille aux biomolécules, ainsi que des fonctionnalités chimiques et physiques sans précédent aux petites échelles. En plus des nanosondes, nanovecteurs et nanoactivateurs théranostiques évoqués plus haut, les principales contributions de la nanotechnologie sont attendues dans les domaines suivants :

- Les **mesures de précision** sur des biomolécules et des cellules, par exemple la mesure des grandeurs diélectriques des tissus et des bio-fluides, à l'aide d'un réseau d'antennes positionnées, comme dans un tomographe, ou des nanoparticules plasmoniques avec une optique compacte utilisées pour un séquençage de nouvelle génération multiplexé en temps réel, ou pour surveiller le microbiote humain ;
- Le **fractionnement** des solutions en volumes plus petits (micro/nano/picolitre) contenant un nombre discret

de molécules ou de cellules : par exemple en combinant la contraction des gouttes dans un écoulement microfluidique et la cristallisation en solution des produits pharmacologiques pour leur caractérisation ou leur détection. À une échelle proche de « l'analyse numérique », le fractionnement donne des volumes contenant un nombre discret d'entités biologiques pour une détection rapide de type PCR ;

— Le développement de **capteurs** électriques, optiques ou mécaniques pour la détection quantitative de biomolécules à l'état très dilué, sous formes d'analytes cibles (enzymes, ADN, antigènes, métabolites...) souvent cachés dans une foule d'autres molécules similaires, pour le diagnostic clinique d'événements rares. Une nouvelle génération de capteurs ultrasensibles exploite des effets physiques originaux tels que phénomènes collectifs et transitions de phases ;

— Les **nanos constructions multifonctionnelles** telles que nanofibres/nanotubes, dendrimères, capsules, vésicules lipidiques, origami d'ADN, pour une administration peu invasive en thérapie : la fonctionnalisation par des agents thérapeutiques (tels qu'ARN/ADN, anticorps ou cellules modifiées) permet de cibler un tissu ou un type de cellule particulier ou de servir d'actuateurs ou de nano-robots ;

— Les motifs de surface pour confiner et contraindre les molécules/cellules afin de faciliter la détection et l'analyse multiplexée et haut débit.

PHYSIQUE DES PATHOGÈNES

La physique des agents pathogènes est devenue récemment un domaine d'étude à part entière pour décrire et modéliser le comportement, les interactions et la propagation des agents infectieux responsables de maladies, tels que les bactéries, les virus, les champignons et autres parasites. L'étude des propriétés biophysiques de ces agents permet de mieux comprendre leur croissance et différenciation, leurs propriétés d'adhésion et leurs interactions avec les cellules hôtes. La mécanique des interactions hôte-pathogène, la rhéologie des biofilms, la dynamique des fluides sont quelques exemples de recherches qui englobent à la fois expériences et théorie. L'objectif ultime est de fournir des moyens de prévention et de thérapie en perturbant les paramètres physiques d'infection, de propagation et de survie des agents pathogènes. En France, les chercheurs et les chercheuses de ce domaine émergent sont généralement dispersés dans différents laboratoires et leurs découvertes n'ont donc pas encore un chemin direct de type *bench to bedside*.

MODÉLISATION ET PHYSIQUE THÉORIQUE

En fournissant un cadre théorique pour la compréhension de phénomènes biologiques complexes, tels que le repliement et la fonction des protéines, les interactions moléculaires et les voies de transduction des signaux, les modèles aident à dévoiler les principes fondamentaux qui sous-tendent les processus biologiques. Les modèles peuvent ainsi contribuer à concevoir de nouveaux mé-

dicaments et à aider au développement de la médecine personnalisée, des immunothérapies ou des traitements antiviraux, ou encore à rationaliser la pratique médicale, par exemple en guidant les protocoles d'administration des médicaments (le dosage des antibiotiques, des vaccins, des thérapies anticancéreuses). Les modèles inspirés de la physique ont l'avantage d'être **interprétables** et de fournir des informations sur des **mécanismes** inaccessibles à d'autres approches de type «boîte noire». Un exemple important est la théorie des réseaux et les concepts de la mécanique statistique utilisés pour analyser une variété de problèmes pertinents pour la médecine, allant du codage neuronal à la propagation d'une épidémie. La physique statistique s'est révélée importante pour l'analyse et la conceptualisation des *big data* typiques de la médecine moderne en développant le domaine de l'apprentissage automatique et de l'inférence de modèles interprétables à partir de données, par exemple à partir de données d'expression génétique, de séquences, etc. La modélisation est également importante pour la médecine personnalisée et pour prédire les comportements émergents en matière de santé et de maladie.

L'immunologie et la virologie, qui ont connu une accélération à la suite de la récente pandémie, constituent un domaine où des progrès passionnants sont en cours de réalisation. La modélisation statistique permet de prédire les prochaines mutations virales attendues et la manière dont le système immunitaire peut évoluer pour y faire face. La physique statistique peut également contribuer à la modélisation **multi-échelle** de **données personnalisées** croisées avec des données à l'échelle de la population, ce qui commence à se faire dans le contexte du répertoire immunologique. La modélisation du microbiome est un autre exemple où la physique statistique est pertinente et prometteuse.

La France dispose d'une grande expertise en physique biologique théorique, dont une partie est déjà orientée vers des questions pertinentes pour la médecine moderne. Il est important que ce champ continue son développement et que les progrès réalisés soient intégrés dans la politique de santé.

VERS DES SYSTÈMES PORTABLES ET ULTRAPORTABLES

Le potentiel des systèmes d'imagerie et de thérapie portables va bien au-delà de la simple possibilité de les transporter au lit du patient. Ils permettront à terme non seulement d'effectuer des examens diagnostiques et de surveillance médicale à des endroits éloignés des centres médicaux traditionnels, mais également de traiter les patients afin notamment de pallier les déserts médicaux en France. Poussés à leurs extrêmes limites, les systèmes ultra-portables seront directement portés sur le corps ou intégrés dans des vêtements ou des accessoires. À plus court terme, deux voies de développements de dessin : étendre la portabilité de systèmes existants

comme l'IRM ou la radiothérapie portable, et offrir de nouvelles fonctionnalités à des systèmes déjà transportables.

PORTABILITÉ DE SYSTÈMES EXISTANTS

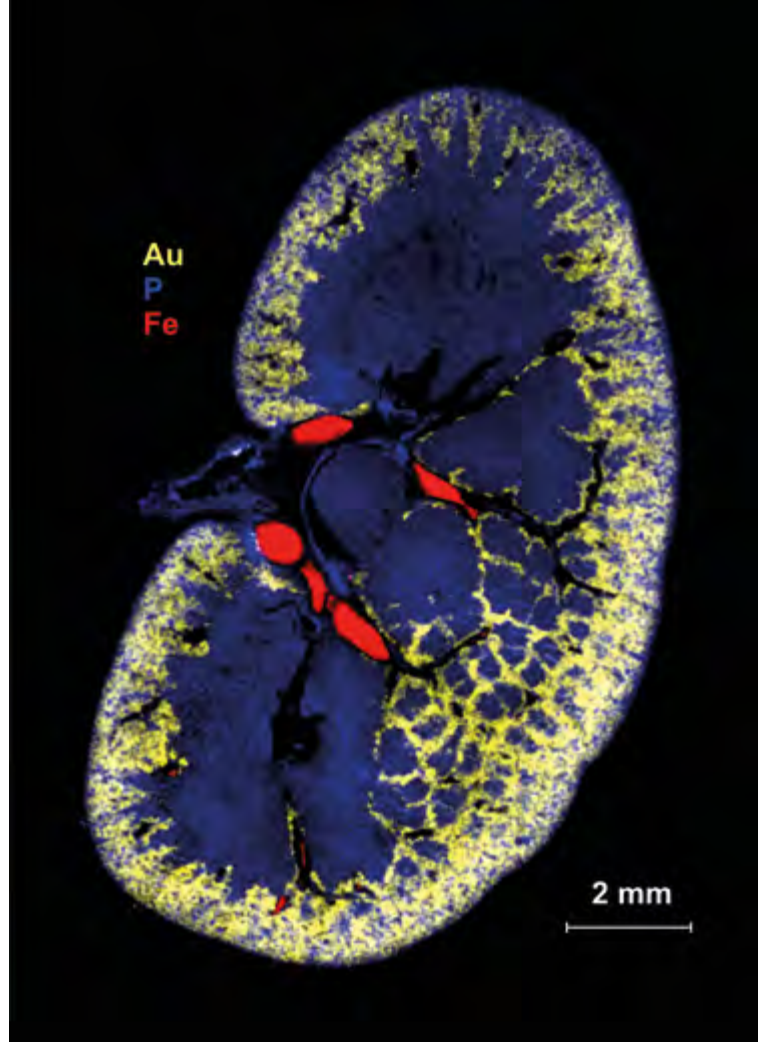
Les systèmes d'IRM standard actuels restent complexes en termes d'infrastructures et d'implantation. Ils nécessitent un environnement contrôlé (température, hygrométrie, distance de sécurité) et un accès constant aux réseaux électriques. Une alternative à ces systèmes est le développement de l'**IRM à champs faibles et ultra-faibles**, qui ne nécessite pas d'aimant supraconducteur et dont la baisse du rapport signal sur bruit pourrait être compensée grâce au développement de **capteurs hautement sensibles** tels que les SQUID ou SQUIF ou encore des antennes supraconductrices sur de larges volumes. La fabrication d'aimants à champ faible, mais très homogène et stable, qu'ils soient permanents ou résistifs, nécessite la mise en place de nouvelles technologies ou l'utilisation de nouveaux matériaux. Les techniques de gain de signal telles que la polarisation dynamique ou le pompage optique peuvent être de bons candidats pour le développement d'une imagerie spécifique et ciblée de l'activité biologique. Ces systèmes, bien qu'offrant une qualité d'image moindre, ont l'avantage d'être quasi-portables et peuvent donc être utilisés dans des environnements encore inaccessibles aux systèmes d'IRM (bateaux, champs de bataille, zones reculées, etc.).

Le développement des systèmes de radiothérapie transportable est en émergence, et il en est de même des accélérateurs linéaires d'électrons compacts et portables. La première unité de radiothérapie transportable a déjà vu le jour pour permettre à des populations reculées d'avoir un accès aux soins plus précocement.

NOUVELLES FONCTIONNALITÉS DE SYSTÈMES PORTABLES EXISTANTS

Les échographes disposent d'atouts majeurs : ils sont transportables, non-irradiants, économiques. Mais ils présentent une limitation majeure : la propagation des ultrasons est affectée par les barrières osseuses, dont le crâne. Les travaux récents de formation de front d'onde pourraient être poursuivis pour atteindre un niveau de précision suffisant pour l'imagerie ultrasonore des structures cérébrales. Ils viendraient ainsi compléter une autre découverte récente, l'imagerie ultrarapide par onde plane, qui a centuplé la sensibilité de la mesure des flux sanguins. La combinaison des deux approches ouvrirait la voie à l'imagerie de l'activité cérébrale par un système portable et à bas coût. Il ne s'agit que d'un exemple du potentiel de la physique des ondes en médecine. Les techniques de formation de front d'ondes concernent toutes les ondes, de l'acoustique jusqu'à l'électromagnétisme. Les recherches en optique sont d'ailleurs à l'heure actuelle particulièrement poussées, avec des équipes françaises à la pointe de la recherche internationale. La physique des ondes et son corollaire actuel, le dévelop-

Rein de rat ayant préalablement
reçu une dose de nanoparticules
d'or. © Vincent MOTTO-ROS/
Lucie SANCEY/ILM/CNRS Image



pement des métamatériaux, devraient logiquement être à l'origine d'un nombre croissant d'applications en santé, en imagerie comme en thérapie.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES THÉRAPIES ET DU DIAGNOSTIC

Le domaine de la santé, qu'il s'agisse des méthodes de diagnostic ou des procédés de soin, ont un impact environnemental très important : coût énergétique, déchets toxiques, utilisation de consommables à usage unique et à base de plastique, utilisation de rayonnements ionisants, dispositifs et médicaments à durée d'utilisation courte, transport, production mondialisée, procédés de production de médicaments et de biothérapies... Ce coût environnemental, souvent lié à des coûts économiques, est souvent justifié par les impératifs sécuritaires et réglementaires et les bénéfices individuels ou collectifs en termes d'espérance de vie et/ou de qualité de vie. Une démarche de fond est initiée dans le monde hospitalier pour mesurer précisément l'impact environnemental de chaque traitement et de comparer les bénéfices pour le patient traité au risque environnemental collectif qui peut affecter des milliers de personnes sur des temps longs. La recherche et l'innovation, et en particulier les physicien·es, se doivent d'apporter leurs contributions pour proposer une démarche rationnelle et quantitative afin de réduire l'impact environnemental de la santé.

PERSPECTIVES

Comment favoriser les découvertes fortuites tout en promouvant le plus efficacement possible la physique pour la santé ? Comment maximiser l'impact sur les pratiques médicales futures et la santé publique en général ? La France dispose d'un potentiel unique d'innovation en la matière : il ne fait aucun doute que certaines des découvertes récentes en physique fondamentale dans les laboratoires de recherche français portent en germe les révolutions médicales de demain. *In fine*, seul le transfert industriel permettra néanmoins à ces recherches de bénéficier au plus grand nombre. Les organismes de recherche sont à ce titre d'ores et déjà dotés de structures de valorisation performantes. Les organismes de recherches n'ont pas pour vocation de se substituer aux entreprises et doivent donc affirmer des choix scientifiques **forts** et **trop risqués** pour des entreprises, comme le financement de **projets aux extrêmes**. L'imagerie IRM illustre cette approche : les entreprises se concentrent sur les hauts champs magnétiques tandis que les laboratoires développent les ultra-hauts champs magnétiques pour une résolution inégalée et les ultra-bas champs pour une portabilité nouvelle. Les sections du CNRS et INSERM, qui possèdent une vision d'ensemble des projets scientifiques les plus prometteurs pourraient, en amont, être des acteurs majeurs dans l'identification d'innovations à fort potentiel en santé, tandis que les structures de valorisation pourraient accompagner réglementairement les projets dès les premières phases de conception de dispositifs dédiés aux preuves de concept chez l'homme.



Décollage d'un ballon stratosphérique ouvert (BSO) durant la campagne Magic 2021.
© Thibaut VERGOZ / MAGIC 2021 / CNRS Images

Physique pour l'énergie et le climat

RÉSUMÉ

Face aux crises climatique et énergétique, la France s'est engagée dans une **transition énergétique** vers un mix énergétique décarboné en 2050, avec un cap crucial à franchir en 2030. Cette transition va nécessiter des sauts conceptuels ou technologiques et une prédiction du contexte climatique impactant la consommation énergétique. De nombreux physicien·nes seront ainsi impliqués dans des travaux liés à l'amélioration des dispositifs de conversion d'énergie, dans les scénarios de transition ou dans la physique du climat à l'horizon 2035.

En **fission nucléaire**, de nouveaux concepts de réacteurs (*Small Modular Reactors*, réacteurs de 4^e génération) nécessitent l'acquisition de nouvelles données de base (modélisation neutronique et thermo-hydraulique, couplages multi-physiques). Le déploiement de la **fusion nucléaire** nécessitera des avancées expérimentales, théoriques, numériques (instabilités, turbulence et transfert radiatif à des échelles multiples) et technologiques (champs magnétiques intenses, lasers haute cadence, matériaux). L'augmentation de l'efficacité des **convertisseurs photovoltaïques** suppose l'émergence de nouveaux matériaux et de nouvelles architectures s'appuyant sur la maîtrise des processus de relaxation et des phénomènes physiques aux interfaces, sur les caractérisations multi-physiques, multi-échelles et *operando*, et sur la prédiction du comportement à long terme des dispositifs. Des besoins similaires existent pour la **conversion d'énergie éolienne et hydraulique**. La physique des porteurs d'énergie (électrons, photons, phonons), de leur couplage et de leurs interactions à l'échelle microscopique est cruciale pour la conversion entre les différentes sources d'énergie, que ce soit pour le **moissonnage de l'énergie** à très petite échelle ou pour le développement de nouveaux concepts d'utilisation rationnelle de l'énergie. L'intermittence des énergies renouvelables nécessaires à la transition énergétique impose le recours massif à des moyens de stockage aux échelles globale et locale, où l'efficacité des cycles stockage/déstockage devra être optimisée. Des progrès théoriques dans le domaine des matériaux sont nécessaires pour le **stockage d'hydrogène** à grande échelle (fatigue, cyclage). Dans les **batteries**, une majorité des phénomènes importants (corrosion, formation d'interphases ou de dendrites) ont lieu au niveau des interfaces, nécessitant de développer des méthodes *operando* pour sonder des échelles de temps et d'espace de plus en plus étendues, afin d'améliorer les performances et les durées de vie. La physique peut permettre de limiter l'impact du changement climatique en

contribuant à améliorer l'**efficacité énergétique** des procédés et des matériaux, ainsi que la prise en compte des contraintes de seconde vie et de recyclage dès l'élaboration des matériaux (pour la construction ou l'énergie) et des systèmes. L'optimisation de la **valorisation du CO₂** grâce aux plasmas froids est une autre piste à explorer. Pour réussir la transition énergétique, un enjeu important est de comprendre globalement, à l'aide d'outils physiques, l'**interaction complexe** entre demande sociale, déploiement des réseaux électriques et urbains, et demande en minéraux disponibles pour les équipements utilisés.

Physique pour l'énergie et le climat

Le couplage climat/énergie a un impact majeur sur les scénarios de transition. La physique statistique et la physique des systèmes complexes offrent des outils et des approches spécifiques. Des dizaines de problèmes originaux en physique théorique et en physique expérimentale attendent d'être défrichés pour améliorer la modélisation du climat à l'échelle régionale. Ces études permettront de contribuer aux politiques d'atténuation du changement climatique et d'adaptation en rendant quantitative la compréhension des points de bascule et des événements extrêmes. Pour relever ces défis scientifiques, trois domaines de la physique sont appelés à jouer un rôle clé: (I) la **modélisation** combinant des approches théoriques, numériques et expérimentales basées sur les domaines de la turbulence, de la mécanique, de la mécanique des fluides et des systèmes dynamiques; (II) la **physique statistique** pour développer des méthodologies nouvelles pour l'étude des changements d'échelles et des dynamiques complexes liées au climat; (III) la **spectroscopie** pourvoyeuse de méthodes expérimentales novatrices pour améliorer les mesures et l'observation du système Terre. Plusieurs lignes de force intéressant **énergie et climat** se dégagent: les phénomènes physiques doivent être considérés sur des échelles de temps et d'espace étendues, ce qui nécessite une hiérarchisation des modèles et une connexion entre les différentes échelles; les couplages non linéaires entre différents phénomènes, en général hors d'équilibre et souvent dans des régimes instables, doivent être pris en compte; il est nécessaire de disposer de mesures (directes ou indirectes) en conditions opératoires des systèmes énergétiques; ces caractérisations doivent être validées en modélisant les chaînes d'instrumentation, de manière à disposer de diagnostics synthétiques et de prévisions fiables; la physique doit être abordée avec une approche transdisciplinaire de ces enjeux.

En 2021, l'humanité a consommé plus de 176 000 TWh d'énergie primaire, soit 1/10 000^e (environ) de l'énergie solaire reçue par an à la surface de la Terre. De cette énergie, plus de 80 % provient d'énergie solaire stockée (pétrole, charbon, gaz, biomasse naturelle), qui est ensuite transformée par combustion et qui provoque un relargage de CO₂ portant à 420 ppm sa concentration dans l'atmosphère en 2022. Deux considérations physiques annoncent les crises planétaires qui se profilent derrière ces observations:

(i) si l'humanité extrayait toute sa consommation d'énergie primaire du flux solaire en maintenant un rythme de

2 % de croissance par an, l'ordre de grandeur du prélèvement dépasserait avant la fin du siècle l'amplitude de la variation naturelle d'irradiance du Soleil (0,04 % sur une période de 11 ans), qu'on a montré avoir un impact faible, mais mesurable sur le climat. Cette comparaison montre que l'énergie à notre disposition n'est pas illimitée, ce qui conduit à **une crise énergétique**.

(ii) à bien plus court terme, l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère accroît l'effet de serre qui contrôle la température d'équilibre de la Terre, perturbant ainsi les équilibres climatiques qui en dépendent. Les combustions passées, présentes et futures des stocks fossiles nous précipitent donc dans **une crise climatique**, dont nous commençons à ressentir les effets.

La prise de conscience de ces deux crises imbriquées l'une à l'autre a conduit la France à adopter un plan d'adaptation au changement climatique et une stratégie bas carbone. Trois éléments seront essentiels pour leur succès:

(i) la disponibilité de modèles de climat fiables;

(ii) l'amélioration de l'efficacité énergétique;

(iii) la mise en place d'un plan de sobriété. Les trajectoires de transition indiquent un cap crucial en 2030. Les processus physiques intervenant de façon centrale dans le climat ou les dispositifs de conversion d'énergie doivent pouvoir être étudiés en priorité.

La physique joue un rôle majeur pour traiter ces défis énergétique et climatique. Un premier aspect concerne les dispositifs de conversion des principales sources d'énergie décarbonée. Le second est l'identification des besoins (matériaux, appareils de mesures) et des concepts qui permettront de dépasser les verrous actuels (limites des architectures, criticité des composants et empreinte énergétique des systèmes). La nécessité de gérer l'adaptation de la demande et de l'offre nous amènera à passer en revue les technologies permettant le stockage de l'énergie et les enjeux scientifiques pour leur mise en œuvre. Nous aborderons les questions de la sobriété, de l'efficacité dans l'utilisation de l'énergie et le problème du recyclage *ainsi que* de ses limites (captage et valorisation du CO₂, maîtrise du cycle du combustible nucléaire). Dans le contexte des enjeux climatiques, il sera nécessaire d'estimer l'impact de l'utilisation de ces sources sur les grands bilans climatiques et de les inclure dans les scénarios de transition énergétique et dans les modèles climatiques, en identifiant les verrous qui relèvent du champ de la physique. Le cadre et les problèmes ayant été posés, nous passerons en revue les

besoins d'instrumentations et les méthodologies issues de la physique, sur lesquelles la communauté pourra s'appuyer pour aborder ces problèmes et s'impliquer dans la physique pour l'énergie et le climat.

CONVERSION DE L'ÉNERGIE

À PARTIR DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

En fission nucléaire, la compréhension fondamentale reste un enjeu, et l'arrivée de nouveaux concepts de réacteurs (*Small Modular Reactors*, ou réacteurs de quatrième génération à sels fondus, permettant une grande flexibilité compositionnelle et la transmutation de certains actinides mineurs) nécessite l'acquisition de nouvelles données de base. Des besoins importants en instrumentation existent donc pour développer de nouveaux capteurs et détecteurs adaptés aux conditions d'opération. La recherche fondamentale (expériences et simulations) sur les réacteurs concerne la modélisation neutronique et thermo-hydraulique, les couplages multi-physiques, la modélisation du cycle du combustible et le transport des radionucléides dans les argiles. Ces travaux sont menés de front avec des études environnementales (effet sur les organismes vivants et ressources géologiques disponibles).

Concernant la **fusion thermonucléaire**, les défis sont multiples à l'heure de l'entrée en opération des grandes installations expérimentales où seront atteintes les conditions extrêmes qui devraient permettre l'auto-entretien des réactions de fusion par confinement magnétique (voir le chapitre *Physique des régimes extrêmes*). Elles ajoutent la dynamique des particules chargées rapides à la complexité du plasma chaud hors équilibre où s'entremêlent instabilités, transport turbulent et transfert radiatif. Les régimes du plasma dans les filières magnétique et inertielle diffèrent dans leur densité et leurs temps caractéristiques (fonctionnement quasi-continu en filière magnétique, impulsif en filière inertielle). Des progrès fondamentaux dans la cadence des lasers, leur rendement, ainsi que la fabrication en masse des cibles seront nécessaires pour atteindre une répétitivité suffisante en filière inertielle. Le schéma de fusion devra également être démontré à des gains supérieurs aux valeurs actuelles. En filière magnétique, les technologies d'aimants supraconducteurs à haute température critique pourraient ouvrir la voie à des centrales plus compactes (doubler le champ magnétique permettrait de diviser par 16 le volume du réacteur pour une même puissance). L'extraction de puissance et la maîtrise du confinement (régimes turbulents, bifurcations) restent un point crucial pour les installations de démonstration. La simulation de ces plasmas hors équilibre, qui est nécessaire pour l'opération et l'optimisation des réacteurs, met en jeu une physique non linéaire, complexe et riche, impliquant de nombreuses échelles spatio-temporelles et des effets cinétiques propres aux dynamiques des électrons, des ions ou des particules neutres. Elle se décline en une hiérarchie de modèles et fait appel aux dernières avancées des sciences numériques (intelligence

artificielle, exascale). La validation des modèles repose crucialement sur l'instrumentation et la modélisation de la mesure, qui permet une comparaison intégrée. Enfin, le cycle du tritium reste un enjeu de recherche crucial pour déployer l'électricité issue de ces processus de fusion.

Le développement de **nouveaux matériaux** est un point commun à toutes les filières. Les composants des réacteurs et du cycle du combustible contiennent des matériaux soumis à différentes conditions d'irradiation qui dépendent des filières, de la position des composants dans le système et du type de déchets conditionnés. Les pertes d'énergie des rayonnements et des particules créent des déplacements atomiques et des excitations électroniques, qui se trouvent couplés à des sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques à différentes échelles. Elles induisent aussi une évolution de la composition par transmutation. Pour pouvoir contrôler la dégradation des propriétés, il est ainsi nécessaire d'étudier : la formation des défauts, leur évolution et les phénomènes de synergie électronique/nucléaire ; les effets des contraintes locales ou de champ élastique sur la diffusion ou le piégeage des hétérogénéités ; la formation des bulles de gaz, leur capacité de piégeage ou de création de défauts. Les nouveaux défis résident dans l'étude : (i) des échelles intermédiaires (hétérogénéités, joints de grain, interfaces) et de leur effet sur les propriétés macroscopiques, sur des structures spécifiques obtenues par fabrication additive, ou sur les matériaux à haute entropie ; (ii) des effets de couplage des sollicitations (déformation sous flux, corrosion sous irradiation). Ces défis nécessitent de maintenir à niveau les systèmes d'irradiation et d'approfondir les techniques accessibles au rayonnement synchrotron *in situ* et *operando*, d'assurer la continuité entre les différentes échelles de simulation (atomistique, gros-grains, quasi-continuum) et d'approfondir la modélisation des signaux issus des techniques de caractérisation pour mieux identifier les défauts.

À PARTIR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'**efficacité des convertisseurs photovoltaïques** approche des limites fondamentales pour les architectures mono-jonctions commercialisées actuellement. Au-delà des structures tandem, les architectures basées sur des multi-jonctions paraissent difficilement transférables à l'échelle industrielle. D'autres alternatives existent, basées sur des processus physiques moins maîtrisés, tels que la conversion de photons basse ou haute énergie. Pour augmenter les efficacités de conversion, le contrôle des processus de relaxation est crucial : règles de sélection des transitions, génération d'excitons multiples, porteurs chauds, cohérences, processus coopératifs. Des matériaux optimaux et des développements en physique des systèmes fortement hors équilibre et des approches photoniques sont nécessaires : il faudra comprendre simultanément les parties optiques, électroniques et le couplage des processus avec la dynamique du réseau. La physique des interfaces (étude des

transferts de charge et d'énergie aux petites échelles, leur structure et leur sélectivité) est un autre point clé, car les interfaces contrôlent l'essentiel des conditions pour l'efficacité et la stabilité. Un deuxième défi porte sur **l'émergence de nouveaux matériaux** (voir le chapitre *Électronique et Photonique Avancées*). À l'échelle du térawatt de production globale, les matériaux permettant une production efficace, bon marché et fiable sont encore à découvrir. Des stratégies en rupture seraient susceptibles de changer les paradigmes, comme on l'a vu avec l'émergence des pérovskites halogénées. Un dernier défi concerne **la prédiction du comportement des dispositifs dans le temps long**. Aujourd'hui, rien ne se substitue aux essais en conditions réelles sur un temps long, ce qui constitue un goulot d'étranglement pour l'utilisation des technologies mises au point en laboratoire. Ce domaine négligé est riche de questions scientifiques auxquelles la physique devrait contribuer.

À PARTIR DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Les **systèmes de récupération de l'énergie éolienne** sont appelés à prendre une part importante dans la production électrique, en particulier pour l'éolien offshore qui présente un potentiel important. Un enjeu de la recherche est d'imaginer des solutions durables pour des éoliennes adaptées à la bathymétrie, à la nature des fonds et à des conditions de vent et de mer contraignantes pour les structures et les matériaux. Un autre enjeu est d'assurer le raccordement au réseau électrique et/ou un stockage approprié, avec des impacts toujours plus réduits et pour un coût de production qui soit compétitif. Les défis à résoudre concernent : la modélisation du vent à des échelles spatio-temporelles très variées (de l'échelle de la pale à celle des pays) ; la modélisation de la bathymétrie sous-marine ou des effets de la mer sur la ressource en vent pour les parcs d'éoliennes offshore ; l'instrumentation associée (mesure *in situ* et *operando*, sur bancs dédiés) pour développer les modèles, le contrôle et le pilotage des installations ; la recherche d'alternatives renouvelables ou recyclables à certains matériaux utilisés dans les composants des éoliennes actuelles (terres rares, aimants permanents, matériaux composites...) ; le développement de systèmes de stockage adaptés à la production des éoliennes sur terre ou en mer (production intermittente en mer).

UN NOUVEAU CONCEPT : L'ÉNERGIE OSMOTIQUE

L'énergie osmotique (ou énergie bleue) est une source d'énergie d'origine entropique qui pourrait être extraite du mélange entre les eaux douces des fleuves et l'eau salée des mers. De nouvelles perspectives ont été ouvertes pour sa récupération, peu efficace avec des membranes, à l'aide de phénomènes physiques différents (diffusion-osmose, mélange capacitif...). Les défis portent sur la compréhension et l'optimisation des processus couplés dans des systèmes nanofluidiques et/ou nanoporeux. Pour y parvenir, des approches interdis-

ciplinaires sont nécessaires à la croisée de la physique et de la chimie des interfaces, ou de la science des matériaux. Associer expériences et modélisations est crucial pour comprendre les phénomènes complexes impliquant conjointement la réponse électronique des solides, l'hydrodynamique et la physicochimie des liquides. La préservation des écosystèmes est également à prendre en compte lors de la conception et de la construction des systèmes d'exploitation.

MOISSONNAGE DE L'ÉNERGIE AUX TRÈS PETITES ÉCHELLES

Il est possible de récupérer de l'énergie à l'échelle nanométrique par conversion entre les énergies thermique, lumineuse, magnétique, mécanique ou chimique. L'étape ultime vise à réaliser des conversions multiples dans le même composant. L'ordre de grandeur des énergies récupérables est pertinent pour l'alimentation d'objets nécessitant de petites puissances (du nanowatt au milliwatt), et pour la compréhension du fonctionnement d'autres convertisseurs. La **physique mise en jeu est celle du transport des porteurs d'énergie** (électrons, photons, phonons), leur couplage et leurs interactions, et la physique fortement hors équilibre, le tout à l'échelle nanométrique. Les enjeux sont de :

- (1) dépasser le modèle de Fourier et atteindre le contrôle du transport quantique de la chaleur ;
- (2) développer des modèles de transport de chaleur dans les polymères ou matériaux amorphes, à travers des nano-contacts ou des nano-constrictions ;
- (3) identifier la résistance thermique limite à cette échelle ;
- (4) explorer la physique du phonon : effet thermique cohérent, localisation, effet tunnel ;
- (5) jouer sur le libre parcours moyen de ces phonons ;
- (6) utiliser les fluctuations de charges, de polarisation aux interfaces/surfaces ;
- (7) étudier les transferts de chaleur aux temps ultra-courts ;
- (8) étudier l'activité thermique des cellules.

Ces effets physiques pourront être étudiés dans des matériaux tels que les métamatériaux thermiques, les matériaux à changement de phase, les isolants topologiques, les systèmes non réciproques, les systèmes ioniques ou encore les systèmes à base de biomatériaux (origami d'ADN, cellules artificielles, mitochondries, protéines).

STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Mener la transition énergétique accentue les contraintes pour la conduite des réseaux alimentés par une part importante d'énergies renouvelables variables. Il est en particulier nécessaire de disposer de moyens de stockage à grande échelle. De plus, des moyens de stockage à une échelle locale sont cruciaux pour assurer les besoins en mobilité ou le stockage de l'énergie de sites isolés. Un enjeu important est l'efficacité d'un cycle allant du stockage à la récupération de l'énergie sous forme électrique (Table 1).

Origine	DES (Wh/kg)	RS (élect. A/R)
Essence	10 000	
Hydrogène	30 000	35 %
Air comprimé (CAES)		50 %
Batteries (Pb)	40	70 %
Batteries (Li)	220	90 %
Hydroélectricité (STEP)	0,27 (chute de 100 m)	80 %
Volants d'inertie	10-20	90 %

Table 1: Densité d'énergie (DES) et rendements (RS) de stockage

STOCKAGE À GRANDE ÉCHELLE : LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE

Le stockage d'énergie sous forme de gaz dans des gisements d'hydrocarbures épuisés permet de stocker à grande échelle et à grande profondeur (1000 m à 2000 m). Des cavités salines créées par dissolution de volumes importants permettent aussi de stocker de nombreuses variétés d'hydrocarbures (à environ 1000 m de profondeur, jusqu'à des pressions de 200 bars). Enfin, des cavités minées (profondes de 100 m à 150 m) sont aussi utilisées, où l'étanchéité du stockage repose le plus souvent sur un principe dit de « confinement hydrodynamique » faisant intervenir la nappe phréatique. Ces techniques sont adaptables au stockage d'énergie non carbonée.

Pour le *stockage d'hydrogène*, plusieurs enjeux nécessitent l'acquisition de connaissances théoriques pour une meilleure gestion des risques et pour optimiser les coûts : l'altération des élastomères et la fragilisation des aciers par l'hydrogène, et pour les cavités minées revêtues de membranes métalliques, le comportement des aciers à la fatigue oligo-cyclique, notamment au-delà de la limite élastique. Pour les *stockages d'air comprimé*, la recherche porte essentiellement sur la gestion thermique du stockage en surface pour porter le rendement de 50 % à 70 %, notamment au niveau des matériaux dans le domaine de pression envisagé (200 bars en fin de compression). Enfin, les *batteries à flux en cavité saline* motivent la recherche de couples rédox performants à grande échelle.

STOCKAGE GRAVITAIRE

Une autre possibilité de stockage de l'énergie à relative grande échelle est le *stockage gravitaire* associant deux retenues et des turbines opérant en production d'électricité lorsque l'eau est conduite de la retenue amont à la retenue aval, ou en stockage d'énergie en pompant l'eau de la retenue aval vers l'amont. On réalise ainsi une station de transfert d'énergie par pompage (STEP). Les machines hydrauliques — turbines ou pompes — fournissent de l'énergie très rapidement, mais sont aussi capables d'absorber les excès de pro-

duction. Avec les énergies renouvelables variables, les machines hydrauliques sont de plus en plus sollicitées dans des régimes éloignés du point nominal de fonctionnement.

Ces nouveaux comportements nécessitent de trouver de nouveaux alliages pouvant résister à la fois aux concentrations de contraintes plus récurrentes, à l'abrasion par les sédiments et à l'érosion causée par la cavitation intermittente. La fatigue subie par les aubes ou les parties mécaniques sensibles est encore mal connue et réclame des indicateurs issus de capteurs embarqués pour le diagnostic vibratoire. Ces machines forcées à produire rapidement de l'énergie en travaillant dans des zones d'écoulement instable amènent à changer de paradigme et à ne plus considérer les écoulements internes par une approche globale (rendement moyen, puissance cumulée), mais au travers d'une vision plus dynamique semblable à celle de la physique des transitions (fluctuations de pression, hystérésis hydraulique). Malgré l'augmentation de la puissance de calcul numérique, ces simulations restent très coûteuses en temps et en énergie. L'objectif recherché est de pouvoir utiliser les données des capteurs embarqués pour disposer de simulations intégrant la partie stockage dans un système global.

STOCKAGE LOCAL VIE DES BATTERIES

Le stockage électrochimique de l'énergie constitue actuellement la voie la plus efficace pour assurer le stockage à l'échelle locale. Le développement des batteries ces 20 dernières années a été soutenu par l'essor des appareils électroniques nomades, puis par le besoin grandissant en moyens de transport électriques (vélos, voitures, autobus). Elles sont maintenant produites en masse dans des usines géantes (*gigafactories*).

Sur le plan scientifique, le développement des batteries est majoritairement dû à la découverte de nouveaux matériaux pour les électrodes et les électrolytes, mais les mécanismes de charge/décharge sont longtemps restés mystérieux. Parmi les technologies en cours d'étude, les batteries Li-ion à électrolyte liquide dominent actuellement le marché, mais les batteries dites tout-solide per-

mettraient en principe des performances accrues. Dans les deux cas, une majorité des phénomènes importants (corrosion, formation d'interphases, de dendrites) ont lieu au niveau des interfaces. C'est pour mieux comprendre ces interfaces, et développer des matériaux de plus grandes capacités ou de plus haut potentiel, que des investissements importants ont été réalisés au sein des grands instruments (synchrotrons, sources de neutrons). La difficulté est d'obtenir une très bonne résolution spatiale tout en permettant les mesures sur des dispositifs en cours de fonctionnement (méthodes qualifiées d'opérando). Les échelles de temps et d'espace impliquées sont très étendues, de quelques nanosecondes pour les phénomènes les plus rapides (diffusion du lithium) à quelques années pour comprendre les phénomènes de vieillissement, et pour des dimensions allant de l'échelle atomique à quelques millimètres pour les systèmes complets. L'amélioration de l'efficacité du cycle de conversion électrochimique pour l'utilisation du vecteur hydrogène, qui relève essentiellement de la chimie, devra faire appel à des outils similaires.

RÉSEAUX DE TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

La topologie, l'équipement et le fonctionnement des réseaux de transport et distribution de l'énergie (gazoducs et oléoducs, réseaux de d'électricité et de chaleur) sont fortement impactés par le développement des énergies renouvelables. Le système électrique devant assurer en permanence l'équilibre offre/demande, il doit être conçu pour faire face à ces fluctuations à toutes les échelles de temps, en utilisant la flexibilité de la demande, les échanges et connexions à grande échelle, les moyens de stockage et les moyens de production pilotables. Cette analyse d'un type nouveau est prépondérante dans la détermination des conditions de faisabilité technique et de coût économique. Notre communauté détient les outils spécifiques pour y contribuer et la mener à bien. La variabilité de la production et de la demande peut être assimilée à un processus stochastique, dont la caractérisation à toutes échelles de temps peut se déduire de simulations climatiques. Leur influence sur les réseaux peut être traitée avec les outils de la physique, notamment via des approches d'optimisation sous contraintes : minimisation de l'énergie et de la matière mise en œuvre, tout en optimisant la résilience aux pannes et aux phénomènes extrêmes (canicules, inondations) et en minimisant l'impact des ruptures en cascade dans les réseaux couplés qui incluent une part importante de stockage et une conversion entre vecteurs énergétiques (électricité, gaz et chaleur).

SOBRIÉTÉ, EFFICACITÉ ET RECYCLAGE

Limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C ou 2 °C d'ici 2100, sans recourir de façon massive à la capture et au stockage de carbone, nécessite une réduction de la consommation énergétique globale via la sobriété (réduction de consommation) ou l'efficacité (réduction

des coûts énergétiques à service rendu constant). Bien que souhaitable, la sobriété repose sur des changements de comportements ou des modes de production et de consommation qui relèvent peu de la physique. La physique en revanche peut contribuer de façon majeure à l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés et des matériaux, comme l'amélioration des rendements de conversion pour les différentes sources d'énergie. Les rendements des centrales thermiques approchent maintenant 65 % grâce à l'optimisation des turbines ou de la combustion. Les développements dans le nucléaire (réacteurs de 4e génération, décrits ci-dessus) intègrent, dès la conception, une production pour d'autres usages (hydrogène, dessalement, chaleur urbaine, chaleur industrielle) et une flexibilité de production électrique pour s'adapter à l'intermittence des énergies renouvelables.

EFFICACITÉ DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Le secteur du bâtiment et de la construction produit environ 40 % des émissions mondiales, réparties en CO₂ lié à l'usage du bâtiment (chauffage, climatisation) et en CO₂ lié à la fabrication des matériaux de construction et à leur mise en œuvre sur les chantiers. Le premier peut être diminué par :

- (i) l'isolation thermique, via de nouveaux matériaux bénéficiant des progrès de la théorie des transferts de chaleur à l'interface gaz/paroi et de l'auto-assemblage de matériaux de porosité nanométrique ;
- (ii) des vitrages plus performants (sélectifs, électrochromes) issus de nouveaux matériaux ou de l'amélioration des procédés de dépôt ;
- (iii) des matériaux traditionnels (terre crue) optimisés par la rhéologie ou renforcés par des fibres. Le CO₂ lié à la fabrication (notamment à haute température) peut être réduit en changeant le vecteur d'énergie — ce qui nécessitera des modélisations numériques multi-échelles pour adapter les fours — ou en récupérant la chaleur fatale via des matériaux thermoélectriques à base d'éléments abondants, ou encore via des systèmes optimisant l'échange de chaleur.

CIRCULARITÉ ET RECYCLAGE

Le recyclage de matériaux de construction est aujourd'hui quasiment inexistant. Il souffre d'un déficit de techniques efficaces de séparation des matériaux et de diagnostics de la capacité de ces matériaux à être réutilisés directement lors d'une rénovation. L'économie de matériaux peut également être obtenue en bifurquant vers des constructions plus légères, où le béton est remplacé par des matériaux recyclables (plâtre ou bois) et des assemblages de matériaux (métamatériaux) optimisant des propriétés contradictoires, comme par exemple l'acoustique et la légèreté. Dans les deux cas, il serait intéressant de combiner des approches chimiques et physiques dans le but de réaliser des composites aux interfaces modulables et optimisées. Dans le cas des batteries, la complexité réside dans la collecte d'élé-

ments hétérogènes dans leur composition et leur mise en forme, nécessitant une réglementation permettant la traçabilité (le « passeport batteries »). Les procédés de recyclage utilisent l'hydrométallurgie ou la pyrométallurgie, voire des sels fondus. Ils fonctionnent sans être complètement optimisés, du fait d'une connaissance limitée des mécanismes de dissolution, d'extraction et de réaction des différents éléments. Ils bénéficieraient du développement de cellules pour une analyse sur grands instruments, prenant en compte la difficulté de fonctionnement dans des conditions extrêmes (acidité élevée, hautes températures).

CAPTAGE ET VALORISATION DU CO₂

Le captage et la valorisation du CO₂ sous forme de carburants synthétiques est un type de recyclage potentiellement utile pour le stockage de l'énergie à condition d'augmenter les rendements de conversion. L'utilisation des plasmas froids pour la valorisation du CO₂ tire parti du caractère hors équilibre thermodynamique de ces milieux afin d'obtenir une excitation du CO₂ suffisante pour le rendre réactif vis-à-vis d'autres molécules. Une efficacité énergétique de conversion importante peut alors être obtenue en limitant les pertes d'énergie liées au chauffage du gaz. Des résultats très intéressants en termes de taux de conversion et d'efficacité énergétique ont déjà été obtenus pour les procédés de méthanation, et même récemment pour la méthanolisation. La limitation de ces procédés est le manque de sélectivité, que l'on compense habituellement en associant les sources plasmas froids à des matériaux catalytiques commerciaux. Plusieurs pistes d'amélioration sont à explorer :

- (i) en utilisant des matériaux conçus pour tirer parti des espèces énergétiques générées par le plasma ;
- (ii) en utilisant d'autres types de source plasma que l'actuelle décharge à barrière diélectrique (arc glissant, radiofréquence, micro-ondes, laser nanoseconde pulsé...) pour tirer parti de leurs différentes réactivités chimiques intrinsèques ;
- (iii) en décalant les équilibres chimiques dans la phase plasma par évacuation au fur et à mesure des produits indésirables formés par le plasma. Ainsi, l'association entre plasma-membrane ionique permettrait d'extraire l'oxygène des plasmas de CO₂, empêchant ainsi tous les mécanismes de réaction inverse qui reforment le CO₂ à partir de CO. Il est aussi possible de générer des plasmas de CO₂ au contact d'eau pour hydrogéner le CO₂ et transférer les molécules organiques formées directement en phase liquide.

SCÉNARIOS DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, RÉSEAUX DE TRANSPORTS ET RESSOURCES MINÉRALES

APPROCHE GLOBALE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Les fondements théoriques de la transition énergétique relèvent de la physique, mais les recherches à conduire

pour la transition énergétique sont interdisciplinaires, couplant la sociopolitique et les modélisations physico-économiques. La consommation d'énergie apparaît à tous les niveaux dans l'économie, pour transformer les matériaux, pour corriger leur dégradation naturelle ou pour réparer les objets endommagés dans le cours de leur utilisation. La construction de structures et d'infrastructures, leur maintien en fonctionnement et leur développement s'apparentent aux structures dissipatives auto-organisées, traversées par des flux d'énergie (conservée) qui se dégradent (l'entropie transportée augmente) entre l'entrée et la sortie du système. L'approche physique repose sur une « économie de moyens » en tentant de comprendre les lois régissant le système global tout en intégrant les caractéristiques pertinentes des acteurs de terrain, comme illustré dans le cas des réseaux de transport.

RÉSEAUX ET ORGANISATION URBAINE

En s'appuyant sur la sociologie quantitative et la psychologie, la physique peut travailler à comprendre l'interaction complexe entre les réseaux de transport et la demande sociale, elle-même en évolution, et à évaluer l'impact sur les infrastructures urbaines des contraintes qui en découlent. Les réseaux de transports urbains eux-mêmes sont bien connus, mais le trafic, notamment la relation entre le débit et la densité de véhicules sur un réseau de transport, reste un problème mathématique non résolu, sauf numériquement de façon partielle. Pour ce problème, des données cruciales peuvent être tirées de la téléphonie mobile. Concernant l'évolution des réseaux électriques, centrale pour la transition énergétique, les opérateurs semblent prêts aujourd'hui à un partage avancé de ces informations, ce qui ouvre le champ à une démarche de physique basée sur l'analyse et la modélisation de ces données.

MATÉRIAUX CRITIQUES ET CONSÉQUENCES SYSTÉMIQUES

L'évolution des réseaux électriques et l'ensemble des investissements nécessaires créent une nouvelle demande en minéraux dont la disponibilité peut être critique pour la réussite de la transition énergétique. L'estimation de cette disponibilité repose sur le couplage entre les spécificités physiques (thermodynamiques en particulier) de l'extraction, de la production et/ou du recyclage des minéraux, et les réseaux économiques de leur distribution. Ici la principale difficulté réside dans la modélisation des blocages d'origine humaine (oppositions locales, conflits géopolitiques) qui ont une incidence majeure sur les circuits d'approvisionnement, et par suite sur le déroulement de la transition énergétique. De même, le déploiement de nouvelles technologies, actuellement modélisé par des systèmes dynamiques (équation logistique, Lotka-Volterra), bénéficierait de la prise en compte de phénomènes sociaux contingents susceptibles de conduire à des ruptures (brexit, gilets jaunes). Cette prise en compte est envisageable via des

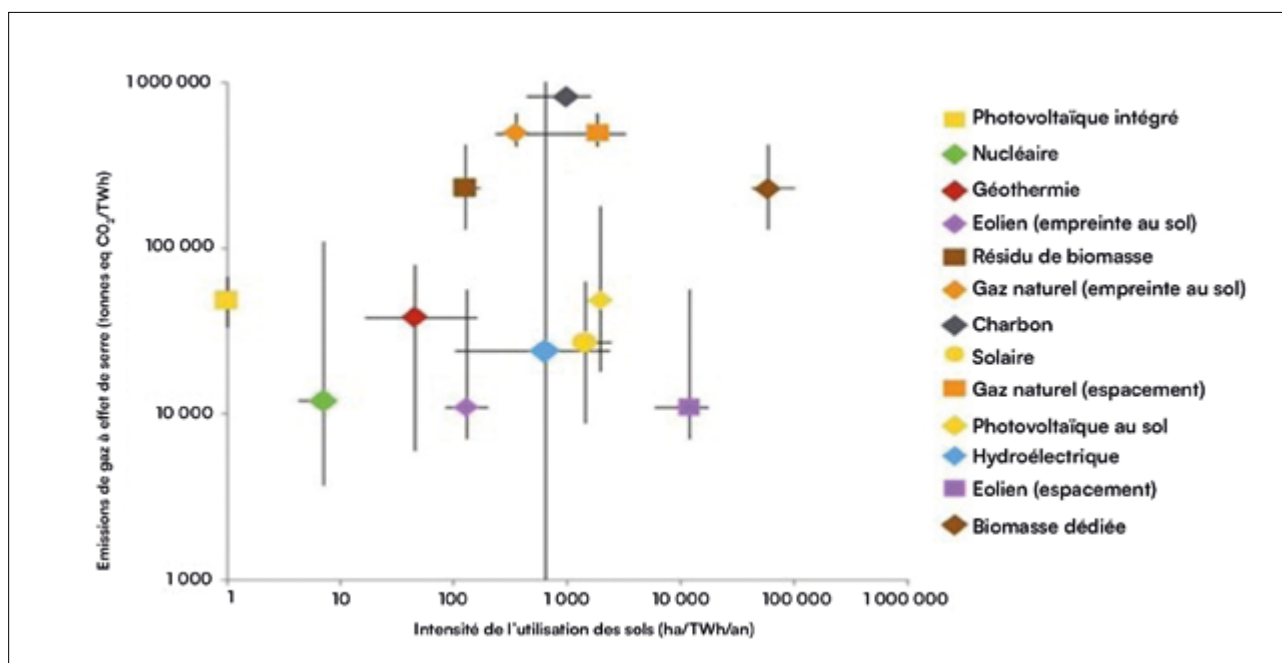


Figure 1 : Masse des gaz à effet de serre par unité d'énergie produite sur l'ensemble du cycle de vie en fonction de la surface immobilisée pour la production d'une puissance électrique donnée, pour différentes technologies de production. Les barres d'erreur représentent l'écart interquartile. (S. Schlömer *et al.*, Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014, pp. 1329-1356.)

«jeux sérieux» (*serious games*) ou bien via la physique statistique.

COUPLAGE ÉNERGIE ET CLIMAT

Les problématiques de l'énergie et du climat sont intimement liées. La production d'énergie impacte le climat par les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre qu'elle implique, comme montré en Figure 1. Inversement, le système énergétique dépend des conditions météorologiques et climatiques. Cette dépendance a un impact majeur sur les scénarios de transition et elle régit notamment les fluctuations de la demande d'énergie en fonction de la température et celles de la production d'énergies renouvelables éoliennes ou solaires. L'adaptation du système énergétique au changement climatique, en particulier aux événements extrêmes de plus en plus fréquents et intenses, est également problématique, que ce soit via le manque potentiel d'eau pour le système énergétique (nucléaire, hydraulique) et les conflits d'usages, la destruction d'infrastructures par les événements extrêmes, ou encore la réponse des réseaux de distribution aux températures extrêmes. Les physicien·nes ont également pour ces problèmes des outils spécifiques en lien avec l'étude des extrêmes climatiques et les événements rares associés.

PHYSIQUE POUR LE CLIMAT

Les sciences du climat font intervenir virtuellement toutes les disciplines scientifiques. Cependant, les

sciences physiques sont au centre de la compréhension moderne de la dynamique du climat, qui repose essentiellement sur le couplage du bilan radiatif avec la dynamique des composantes du système climatique. De nombreux défis scientifiques sont à relever dans ce domaine. Les modèles climatiques sont exceptionnellement fiables pour la prédiction des tendances globales, mais peu fiables quantitativement à l'échelle régionale pour certaines observables. Les modèles ont également des difficultés à prédire la sensibilité climatique, qui quantifie l'augmentation de la température pour un doublement du CO₂ dans l'atmosphère. Le dernier rapport du GIEC en donne une estimation située entre +2,5 °C et +4 °C, avec une valeur la plus probable de +3 °C. Ces barres d'erreurs restent importantes, eu égard au rôle crucial de cette quantité dans les impacts du changement climatique. Les seuils des points de bascule (ou bifurcations) potentiels du système climatique restent également très mal quantifiés. De même, la caractérisation des événements extrêmes souffre du manque de données empiriques, alors qu'elle est par ailleurs très difficile à obtenir à partir des modèles climatiques. Pour relever ces défis scientifiques, trois domaines de la physique sont appelés à jouer un rôle clé :

- (i) la modélisation, combinant des approches théoriques, numériques et expérimentales, basées sur les domaines de la turbulence, de la mécanique, de la mécanique des fluides et des systèmes dynamiques ;
- (ii) la physique statistique, pour développer des méthodologies nouvelles pour l'étude des changements d'échelles et des dynamiques complexes liées au climat ;

(iii) la spectroscopie, pourvoyeuse de méthodes expérimentales novatrices pour améliorer les mesures et l'observation du système Terre.

L'ENJEU DU BILAN CARBONE

Les chercheurs s'intéressant au climat accordent beaucoup d'importance à l'impact environnemental et au bilan carbone de leur recherche, qu'il s'agisse des missions ou des achats de matériel neuf. Ils sont engagés dans des efforts de sobriété et d'efficacité. Plus largement, la réflexion sur l'impact environnemental de nos travaux, et sur la meilleure façon de les mener tout en préservant leurs ambitions, fait partie intégrante des objectifs de recherche, dès aujourd'hui et encore plus dans les années à venir (voir chapitre *Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en physique*).

PHYSIQUE POUR LA MODÉLISATION DU CLIMAT

L'amélioration des prédictions régionales de la sensibilité climatique, l'étude des impacts des changements climatiques, ou encore l'étude quantitative des points de bascule du système climatique nécessitent une diminution des incertitudes liées aux modèles numériques de climat. Il faut pour cela disposer de données plus précises et améliorer les modèles climatiques, en particulier au niveau de la représentation effective (paramétrisation) des degrés de liberté non résolus. Les contributions potentielles des physicien·nes à ces enjeux varient suivant les composantes du système Terre considérées.

Les **océans** couvrent 70 % de la surface de la Terre. Ils absorbent 90 % de la chaleur associée au réchauffement climatique et 30 % du CO₂ émis par les activités humaines. Leur capacité à stocker ces éléments sur des échelles de temps très longues en font un des régulateurs principaux du climat futur. Une description précise des écoulements océaniques est rendue difficile par la large gamme d'échelles et de processus mis en jeu. En particulier, des paramétrisations relativement *ad hoc* sont utilisées pour décrire tous les processus de transfert turbulent à petite échelle, en vue de comprendre la dynamique du système à grande échelle. En réalité, trois processus gouvernent la stratification des océans et la circulation méridionale océanique : le vent dans l'océan austral, la convection au voisinage des pôles et la diffusion turbulente au sein des bassins océaniques. Certains de ces processus ne sont que partiellement compris dans le contexte océanique alors que différents systèmes idéalisés permettent de les étudier de façon indépendante et d'obtenir des lois d'échelle simples (cités par exemple la turbulence barocline). À une échelle plus globale, certaines descriptions modernes de la circulation méridionale océanique ne datent que des années 2010, ce qui montre que des progrès majeurs ont encore été effectués récemment. Enfin, la diffusion turbulente dans les bassins océaniques est due aux ondes internes qui rayonnent au niveau des structures topographiques au fond de l'océan, au régime non-linéaire

de ces ondes, voire à un régime de turbulence d'ondes.

La cryosphère terrestre fait référence à l'ensemble des milieux gelés, permanents ou saisonniers, à la surface de la Terre. Elle est le siège de processus thermodynamiques, non-linéaires et multiphasiques. La mutation de la cryosphère est lancée, du fait du changement climatique. La banquise de l'océan Arctique décline rapidement et pourrait disparaître d'ici à la fin du siècle. Les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique se déversent de plus en plus vite dans les eaux polaires depuis plusieurs décennies, augmentant le niveau des mers. Les glaciers montagneux disparaissent, modifiant le débit de nombreuses rivières. Le pergélisol se dégèle, relâchant des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Parmi les verrous scientifiques relevant du champ de la physique, on peut citer :

- (1) l'absence de modèles fiables des couches limites turbulentes, modèles qui permettraient de prédire les flux de chaleur de l'océan vers la glace, dans les régimes sous-glaciaires observés sur le terrain ;
- (2) la difficulté de modéliser les fractures au sein des plateformes glaciaires, dont certaines peuvent mener au vélage d'icebergs ;
- (3) l'impossibilité actuelle de caractériser la probabilité de passage d'un point de bascule au sein de la cryosphère (passage d'une cavité océanique froide à chaude ; instabilité des calottes marines (MSI, *marine ice sheet instability*) et instabilité des falaises marines (MICI, *marine ice cliff instability*) ;
- (4) l'absence de modèles d'évolution fiables de la glace de mer, dont la dynamique à l'échelle d'un floe (fragment de banquise) unique, et à l'échelle d'un agrégat de floes multiples est aujourd'hui mal comprise ;
- (5) l'absence de modèles fiables des interactions ou du frottement glace/rocher avec ou sans lubrification, modèles qui permettraient de reproduire l'ensemble des dynamiques glaciaires observées sur le terrain (mouvement lent, mouvement rapide, ou encore ancrage).

Un enjeu clé pour améliorer la modélisation de la dynamique de l'**atmosphère** et de son bilan énergétique est la modélisation de la dynamique des nuages, non résolue dans la grande majorité des modèles. Une augmentation rapide des données disponibles, venant à la fois d'observations, de modèles avec des résolutions kilométriques, et de simulations à des échelles intermédiaires devraient permettre des progrès importants dans les années qui viennent. Des modélisations issues de la physique statistique pourraient être utilisées pour décrire la distribution spatiale des nuages. De nouvelles expériences spécifiques de mécanique des fluides, étudiant la convection avec transition de phase, pourraient être des compléments très intéressants pour la compréhension de ces phénomènes.

Une grande partie des incertitudes concernant les mécanismes de déclenchement, de bascule ou de rétroaction est liée à la complexité de la **physique aux interfaces** des grandes sphères de la Terre. Les verrous scienti-



Tokamak. © Institut Max Planck de physique des plasmas (Allemagne)

figues se situant à chaque interface sont :

- (1) interface air-terre : transferts radiatifs, turbulence de couches limites, ondes, convection ;
- (2) interface air-eau : vents, interaction vent/ondes de surface, flux air/mer ;
- (3) interface eau-terre : dunes, granulaires ;
- (4) interface glace-air : milieu granulaire, problème de bilan radiatif ;
- (5) interface glace-terre : fracture, frottement ;
- (6) interface glace-eau : couplage entre thermodynamique et dynamique à grande échelle, convection.

PHYSIQUE STATISTIQUE POUR LE CLIMAT

La physique statistique est à l'origine de plusieurs résultats importants concernant le climat : l'explication de l'auto-organisation des écoulements atmosphériques et océaniques ; la caractérisation des transitions abruptes dans des dynamiques turbulentes et leurs applications aux circulations terrestres et planétaires ; les changements d'échelles dans des dynamiques du système climatique ; la caractérisation des événements rares ou extrêmes grâce à la théorie des grandes déviations et à l'adaptation aux modèles climatiques d'algorithmes de multiplications d'événements rares ; le développement de méthodes d'apprentissage couplées avec une modélisation physique. Plus généralement, les dynamiques turbulentes de l'atmosphère et des océans peuvent se décliner en des dizaines de problèmes fondamentaux relevant de la physique statistique et pouvant mobiliser des dizaines de personnes.

SPECTROSCOPIE POUR UNE MEILLEURE OBSERVATION DE L'ATMOSPHÈRE ET DU CLIMAT

La spectroscopie optique relative au système Terre et au climat inclut la spectroscopie atomique, moléculaire ainsi que la spectroscopie de la matière condensée (agrégats, aérosols, nuages, plancton). La connaissance des constantes spectroscopiques et polarimétriques des composants du système Terre est fondamentale dans l'évaluation du bilan radiatif et thermiques de la Terre tout autant que dans l'élaboration des instruments optiques d'observation. Les contributions de la physique sont majeures aussi bien dans la démarche expérimentale que dans les approches théoriques. Les futurs travaux de spectroscopie relatifs au climat couvrent trois domaines de recherche reliés à la physique :

- (i) la mesure avec une précision extrême des constantes spectroscopiques des gaz à effet de serre, de la vapeur d'eau et de son dimère, et de l'ensemble des bandes d'absorption très faibles ou encore à découvrir ;
- (ii) la spectroscopie et la polarimétrie de la matière condensée contenue dans l'atmosphère (aérosols, noyaux de condensation) et les océans (planctons) et la comparaison des théories existantes avec celles issues de la physique statistique ;
- (iii) l'élaboration des futures plateformes d'observation du climat en exploitant des propriétés spectrales et polarimétriques de la matière, ainsi que l'utilisation de nouvelles sources de lumière, afin d'optimiser les quatre piliers de la mesure : précision, sensibilité, fiabilité et consommation énergétique.

MÉTHODOLOGIES ISSUES DE LA PHYSIQUE

Pour la compréhension des relations systémiques entre les variables physiques, technico-économiques, économiques et sociales du système énergétique et climatique, et de leurs évolutions possibles dans le futur, un outil fondamental est la modélisation, ainsi que la traduction des différentes hypothèses et relations sous formes de scénarios. Une myriade de modèles va pouvoir être utilisée, suivant la simplicité, la complexité et le réalisme des représentations des phénomènes en jeu. Un enjeu scientifique fondamental est d'obtenir des représentations et des quantifications des phénomènes qui soient cohérentes et interrogeables à travers cette hiérarchie de modèles. Un tel objectif, souhaitable, est loin d'être atteint avec les modélisations actuelles, et il constitue un défi majeur pour le futur. Au sein même de la physique, les besoins de modélisation de dispositifs complexes, isolés ou en interaction avec un environnement lui-même porteur de complexité, font appel à ces mêmes outils. C'est particulièrement le cas pour la gestion de l'énergie, la prévision climatique, et leurs interactions.

PHYSIQUE DES SYSTÈMES MULTI-COMPOSANTES ET MULTI-ÉCHELLES

La physique a développé dans le passé une gamme d'outils spécifiques et incomparables pour tous les systèmes multi-composantes et multi-échelles, en particulier ceux que nous venons d'évoquer dans ce chapitre. En physique, un phénomène est abordé en simplifiant la géométrie, en utilisant des approximations, en exploitant les symétries et en décomposant le système en petites briques élémentaires. Cette approche permet de développer une hiérarchie de modèles, basés sur la physique des composants du système, et allant du simple (interprétable, analysable) vers le complexe (réaliste, opérationnel). Des allers-retours incessants dans cette hiérarchie permettent de profiter des simplifications pour aboutir à une compréhension conceptuelle profonde, et ils donnent l'assurance d'avoir tenu compte de tous les processus physiques pertinents. La modélisation simplifiée des physicien·nes est également très bien adaptée à la démarche de validation expérimentale des travaux théoriques, dont l'absence peut sinon fragiliser les scénarios ou les résultats numériques. Cette démarche peut parfois passer par une approche combinée expérience/numérique pour concilier les mises à l'échelle, avec le développement d'outils numériques à différents niveaux de fidélité, et celui de bancs d'essais expérimentaux. C'est par exemple une perspective importante pour la modélisation réaliste du fonctionnement d'éoliennes offshore, lorsque les mesures sur site ne permettent pas d'isoler les phénomènes ou d'avoir une reproductibilité des conditions de fonctionnement.

PHYSIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES

Un enjeu majeur est de savoir si l'approche systémique ci-dessus, prenant en compte de multiples composants

et de multiples échelles, converge pour le climat ou les systèmes énergétiques; c'est-à-dire savoir si on s'approche davantage de la réalité à mesure que les modélisations deviennent plus précises (ajout graduel de nouveaux processus par exemple). Une telle question relève de la physique des systèmes complexes, dont le comportement global ne peut se ramener à une superposition de leurs composantes individuelles (voir le chapitre *Systèmes complexes*). Cette physique des systèmes complexes est encore largement à bâtir, en s'appuyant sur des outils déjà existants comme la physique statistique hors-équilibre, la physique non-linéaire ou les mathématiques, complétés de nouveaux concepts qui restent à créer et développer, et qu'on peut rassembler sous le terme «physique des interactions complexes et de l'émergence».

LA BOÎTE À OUTILS DE LA PHYSIQUE

Quelques méthodes clés servent de support aux démarches ci-dessus : la théorie des systèmes dynamiques (chaos, bifurcations, instabilités), la théorie des réseaux, la physique statistique hors équilibre, les analyses multi-échelles pour relier les descriptions à différentes échelles de temps et d'espace, la théorie des grandes déviations et les outils associés pour l'étude des événements rares, la science des données pour les systèmes en grande dimension, l'assimilation de données dans les systèmes dynamiques, la modélisation et la description des écoulements turbulents, et plus récemment l'intelligence artificielle guidée afin de prendre en compte des relations physiques fondamentales.

PHYSIQUE DE L'APPRENTISSAGE

L'intelligence artificielle est un outil novateur, qui peut potentiellement aider à résoudre les problèmes de prédiction climatique, d'apprentissage de dynamiques effectives, de transport turbulent et de paramétrisation car elle permet de s'affranchir de modèles physiques dans les cas où ceux-ci restent trop complexes. L'IA peut aussi permettre de réduire la quantité de données nécessaires à la mise en place de simulations rapides, parfois même en temps réel pendant les expériences correspondantes. Ce sujet est discuté dans le chapitre *Nouveaux enjeux pour les méthodes numériques*. Il apparaît de plus en plus clairement que les physicien·nes ont un rôle important à jouer dans ce domaine. D'une part, les méthodes d'apprentissage statistique nécessitent d'être guidées afin de respecter les grands principes physiques (conservation de la masse et de l'énergie, par exemple). Ensuite, ces méthodes d'apprentissage nécessitent de grands jeux de données, qui ne sont pas toujours disponibles expérimentalement (manque de données dans l'océan profond, par exemple), et pourront parfois être remplacés par des données synthétiques issues de simulations. Enfin, contrairement aux méthodes de physique, les méthodes d'apprentissage ne sont pas à même d'identifier les grands principes relativement simples qui gouvernent parfois les systèmes complexes.

INSTRUMENTATIONS ET MODÉLISATION

INSTRUMENTATION POUR LA CONVERSION DE L'ÉNERGIE

Le secteur du nucléaire présente un besoin essentiel de développer des capteurs permettant le suivi du fonctionnement et des performances des réacteurs ou la validation des modèles, dans un environnement extrême qui ne permet pas des mesures directes. Pour les plasmas de fusion, cet effort s'appuie sur une physique riche (optique, spectroscopie, sondage ondes et particules, mesures magnétiques...) qui nécessite le développement de diagnostics synthétiques couplés aux codes de simulation pour une comparaison fidèle et réaliste. D'autre part, il est important d'améliorer et d'optimiser la caractérisation *in situ* et *operando* des matériaux nucléaires pour visualiser et quantifier les défauts à l'échelle locale (joint de grain, croissance de cavités/bulles, cascade unique...) ou accéder au déroulement temporel des processus. De même, dans le domaine du photovoltaïque, les études impliquant les interfaces nécessitent de nouveaux outils qui permettent le suivi de l'évolution des matériaux et de ces interfaces dans leur environnement opérationnel, ou l'utilisation combinée de plusieurs techniques pour le suivi des cellules. Pour les éoliennes, des mesures *in situ* sont aussi indispensables pour guider les développements (capteurs sur les éléments de la turbine : pales, nacelles, mât, génératrice, flotteurs). En conditions opératoires, de telles mesures doivent permettre d'améliorer les technologies de surveillance et de contrôle distant (particulièrement critiques pour les éoliennes offshore), ainsi que le pilotage individuel des divers organes des éoliennes pour développer des stratégies intelligentes de pilotage à différentes échelles (rotors/parcs/interaction entre parcs, flotteur). L'objectif ici est d'optimiser l'extraction d'énergie à l'échelle des parcs, de diminuer la fatigue des différents composants et d'augmenter la durée de vie des rotors. Finalement, le moissonnage de l'énergie à petite échelle requiert de développer de nouvelles méthodes de fabrication à des échelles inférieures à 10 nm, ainsi qu'une métrologie des systèmes nanométriques pour quantifier et comparer les efficacités.

INSTRUMENTATION POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Pour l'étude des processus physico-chimiques dans les batteries, de nombreuses techniques *operando* ont été mises en place, mais il est actuellement très difficile de relier les informations entre elles. Une tendance importante, qui va certainement s'accroître encore dans les prochaines années, consiste à mettre en place des caractérisations multimodales (ou corrélatives), au cours desquelles plusieurs techniques sont utilisées en même temps sur la même cellule. Par exemple, combiner de la tomographie avec de la diffraction ou de la microscopie permet de relier la microstructure aux phénomènes de dégradation. En particulier, des mesures mécaniques,

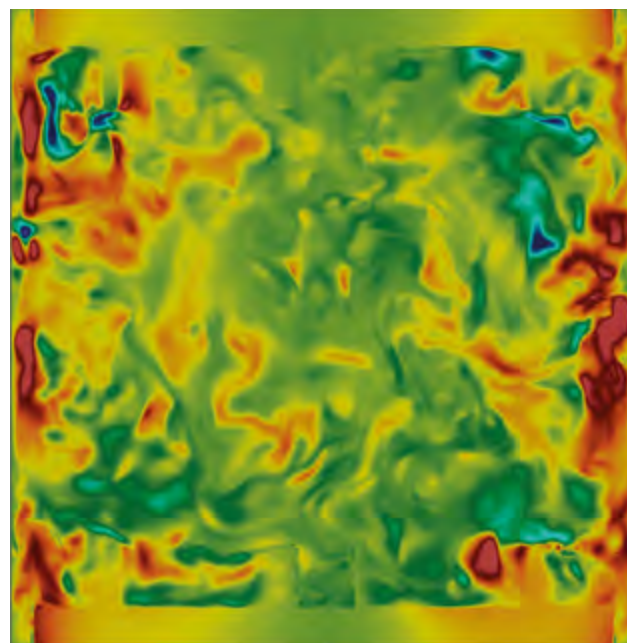
jusqu'ici souvent mises de côté, devront être couplées aux études visant à connaître la chimie des matériaux. Des besoins similaires à ceux des éoliennes existent pour les systèmes de stockage gravitaire de l'énergie (STEP) : le défi est de concevoir des capteurs intégrables lors de la fabrication des machines. Ils permettraient également d'alimenter en données des jumeaux numériques, avec un gain important en maintenance prédictive, et une opération plus fine et plus flexible.

INSTRUMENTATION POUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Un effort de métrologie est nécessaire pour relier le procédé d'élaboration, des descripteurs d'une microstructure multi-échelle, et les propriétés macroscopiques des matériaux classiques d'isolation (laines minérales, laine de bois...). Il faudrait aussi développer des méthodes physiques de diagnostic énergétique, assez pratiques pour estimer facilement les gains possibles et les gains réalisés (contrôle qualité), et fournir ainsi plus d'incitations à la qualité de la pose de l'isolation.

INSTRUMENTATION POUR LE CLIMAT

Étant donné le rôle prépondérant des gaz à effet de serre dans le réchauffement climatique, il est primordial de disposer de modèles et mesures précises de l'évolution spatio-temporelle de leur émission et de leur dynamique. D'un point de vue instrumental, cela suppose d'améliorer la sensibilité, la spécificité et la rapidité de la mesure, pour atteindre des résolutions de l'ordre de la milliseconde.



Zones de haute irrégularités dans l'expérience «Giant von Karman». Les zones régulières sont en vert, et les zones les plus irrégulières sont en rouge ou en bleu, selon leur signe. © Bérangère DUBRULLE



Mesure Lidar dans l'atmosphère.
© Cyril FRESILLON/ILM/CNRS Images

Physique pour l'environnement, l'urbain et l'alimentation

RÉSUMÉ

Les enjeux de la physique pour 2030 dans le domaine de l'alimentation, l'urbain et l'environnement sont principalement liés aux transitions auxquelles nous sommes confrontés. Le changement climatique va de pair avec une plus grande exigence de sobriété liée à la finitude des ressources, mais également de résilience et d'adaptation. La population mondiale est vieillissante et en forte croissance et depuis soixante-dix ans, la production agricole et alimentaire a considérablement augmenté. Les impacts écologiques sont tels qu'ils mettent en danger la sécurité alimentaire et nutritionnelle mondiale et les systèmes alimentaires actuels sont non soutenables. L'exode rural qui va en s'amplifiant induit une forte demande en construction ou en rénovation dans un contexte de recherche de neutralité carbone, sobriété et minimisation des impacts environnementaux. Les organismes et les écosystèmes sont soumis à des facteurs de stress et de risques multiples : polluants, particules fines, radiations, perturbateurs endocriniens, antibiotiques, pesticides, nouvelles maladies, bruit, etc. Nous sommes face à des systèmes dynamiques complexes, en situation de « forçage » hors d'équilibre, dont il s'agit idéalement de prévoir la réponse à différentes échelles spatiales et temporelles, ainsi que les trajectoires d'évolution possibles.

Du point de vue de la physique, des avancées sont attendues dans différents domaines : transport, dynamique, transferts et écoulements en milieux complexes : désordonnés, hétérogènes, multiphasiques, physique multi-échelle temporelle et spatiale : couplages, interactions, réseaux et transitions, ainsi qu'instrumentation, données et modèles.

Alimentation, environnement et urbain sont des exemples concrets de systèmes complexes de grande taille incluant une dimension sociale. En valorisant les produits de ses recherches, en donnant du « sens » à la science et en resserrant ses liens avec la société, la physique favorisera l'arrivée de jeunes chercheur.es dans sa discipline.

Physique pour l'environnement, l'urbain et l'alimentation

Les enjeux de la physique pour 2030 dans le domaine de l'alimentation, l'urbain et l'environnement sont principalement liés aux transitions auxquelles nous sommes confrontés, le changement climatique allant de pair avec une plus grande exigence de sobriété liée à la finitude des ressources, mais aussi de résilience et d'adaptation. Sur ces thématiques, il nous a paru tout aussi important d'identifier les défis et urgences à relever que les sujets de physique émergents.

Environnement, urbain et alimentation sont des systèmes complexes en eux-mêmes, pour lesquels une approche systémique est nécessaire; qui plus est, ils sont interconnectés et on ne peut traiter l'environnement, la ville, les sols, l'eau et l'alimentation indépendamment. Une alimentation saine et durable, une diminution de la pollution, la mise en place d'un environnement urbain de qualité: tout cela contribue à ce que l'on peut nommer la «santé globale». Soulignons que, dans le cadre d'une compréhension globale, on peut de moins en moins ignorer le facteur humain et les effets de rétroaction qui en découlent, que ce soit au niveau de l'acceptabilité par les citoyen·nes des modifications de leur environnement physique ou des produits qu'ils ont à consommer. Par rapport aux approches actuelles en physique, une évolution est nécessaire vers une meilleure prise en compte de la complexité du réel, un peu comme l'ont fait les biophysicien·nes depuis une vingtaine d'années en passant de l'étude de systèmes très modèles à des objets biologiques plus réalistes.

Nous avons structuré le document en deux temps, en dégageant les enjeux dans les domaines de l'environnement, de l'urbain et de l'alimentation, puis en les reliant aux thématiques de physique. Ainsi, nous décrivons d'abord les enjeux à partir de la vision que les expert·es nous en ont donnée. C'est dans la suite du document que sont abordées les questions à explorer dans les prochaines années du point de vue de la physique.

LES ENJEUX PAR THÉMATIQUES

ENVIRONNEMENT

Les socio-écosystèmes sont en évolution rapide, voire en crise. Les changements climatiques provoquent des modifications environnementales rapides et marquées. Les organismes et les écosystèmes sont soumis à des

facteurs de stress et de risques multiples: polluants, particules fines, radiations, perturbateurs endocriniens, antibiotiques, pesticides, nouvelles maladies, bruit, etc. Qui plus est, ils ne sont pas indépendants mais connectés entre eux par des flux de matière, d'énergie, d'organismes et de contaminants avec des rétro-actions entre grande et petite échelle. Les processus biotiques, abiotiques et anthropiques sont couplés. Nous sommes face à un système dynamique complexe, en situation de «forçage» hors d'équilibre, dont il s'agit idéalement de prévoir la réponse à différentes échelles spatiales et temporelles, ainsi que les trajectoires d'évolution possibles.

Des enjeux se dégagent dans tous les milieux environnementaux pris individuellement, et dans le couplage entre eux. Pour l'océan, un premier constat est que l'on manque encore fortement de connaissances générales, alors qu'on a besoin de prédire son évolution globale via celle des différents phénomènes dont il est le siège (capitation du CO₂, transport de chaleur, cycles de matière et couplage au vivant...) et des changements qui l'affectent (acidification, pollution, hausse de la température...). Pour répondre à ces questions, il faudra d'abord réaliser plus de mesures (capteurs embarqués, données satellites...) et savoir les analyser. On connaît également très mal les conditions extrêmes de l'océan profond et les modifications qu'apportent à ce niveau le changement climatique et la pollution, ainsi que les zones littorales et les traits de côtes.

De nombreuses questions se posent en ce qui concerne l'eau (eau douce, eau potable, eaux usées, stations d'épuration), qui est sujette à de la contamination et/ou raréfaction. Il s'agit en premier lieu de prédire et piloter sa quantité et sa qualité, en particulier dans les situations transitoires liées aux événements extrêmes et à la pollution: sécheresse, canicule, crues, etc. Pour cela se dégage un besoin de mesures en ligne, de développement de procédés de stockage frugaux et innovants, de dépollution, de filtration et de réduction des pertes d'eau.

Deux grands enjeux se dessinent en ce qui concerne le sol: sa remédiation et l'augmentation de ses performances. Le sol, pollué par les intrants chimiques et divers types de contaminants (métaux, micro ou nanoplastiques, etc.), asséché ou inondé sous l'effet des événements extrêmes, est très appauvri en surface, ce qui diminue les rendements agricoles. Se pose donc la question de rendre vivant un sol mort et, de surcroît, d'amé-

liorer sa fonctionnalité (rendement, rétention d'eau): pour cela, il faut comprendre les interactions entre ce milieu physique, la (bio-) chimie qui s'y déroule et le vivant aux petites échelles (micro-organismes, petits animaux). Les cinétiques de ces divers mécanismes sont très différentes et il faut considérer une large gamme d'échelles temporelles, le sol «macroscopique» évoluant sur des temps longs comparés à ceux des flux qu'on y trouve. Les questions du fonctionnement des arbres en tant qu'objet physique (réseau hydraulique résilient de captation et de distribution, matériau composite structuré à grande résistance mécanique) et de l'interaction plantes-sol sont à l'ordre du jour pour leur potentielle capacité au rafraîchissement des villes, à l'absorption du CO₂ ou à la bio-remédiation des sols. Finalement, de même que pour l'océan, on connaît mal le «sol profond» et son interaction avec la couche supérieure, sujets importants pour les questions très actuelles de géothermie et de stockage dans le sol (CO₂, H₂).

En termes de pollution, ce sont les particules de taille inférieure au micron, jusqu'au nanomètre (aérosols carbonés, bio-aérosols, nanoparticules en milieu aquatique, sol, compost, eaux usées, milieux confinés), qui sont les moins connues et génèrent le plus de risques en termes de santé globale et de modification des écosystèmes. Notons que cette pollution peut avoir de grandes conséquences sur des temps courts, voir l'exemple de la résistance aux insecticides, et que la prise en compte de l'adaptation rapide des écosystèmes est centrale ici, comme dans toute question environnementale (ce qui ne simplifie pas la tâche du biologiste ni des physicien·ne·s).

Les questions émergentes dans ces domaines sont :

- 1) d'identifier les sources de pollution, qui peuvent être à des échelles locales ou globales ;
- 2) de caractériser la distribution chimique spatiale et temporelle de ces polluants, en tenant compte de leur potentielle transformation physique ou chimique dans l'environnement ;
- 3) de déterminer leurs zones d'accumulation et l'exposition des populations ;
- 4) de caractériser leur écotoxicité ;
- 5) de décontaminer, de trouver des substituts, et de mettre en place des marqueurs pour la santé des écosystèmes.

Cependant, il faudrait idéalement pouvoir modéliser le système complet de la pollution, qui est aussi un système économique, depuis la production de déchets jusqu'à leur fin de vie. Dans un tout autre champ, la pollution sonore dans les villes, mais aussi dans les océans, qui impacte le vivant, et la pollution lumineuse sont des questions évidemment en émergence.

Notre civilisation produit énormément de déchets et la question du recyclage concerne de nombreux matériaux: déchets électroniques, radioactifs, plastiques, métaux, matériaux de construction (bitumes, bétons...), intrants chimiques. Elle se pose différemment selon le type

de matériau, et nous n'avons pas eu l'occasion d'explorer l'ensemble des filières au cours de nos entretiens. De manière générale, il y a un besoin d'amélioration au niveau de la collecte et du tri, des procédés, de la sobriété (eau, énergie) et de l'impact environnemental. Pour toutes ces raisons, il faut mieux comprendre la physico-chimie hors d'équilibre couplée à l'hydrodynamique de mélanges de matériaux éventuellement réactifs, qui subissent à la fois changements de température et agitation.

On est loin à l'heure actuelle d'une économie circulaire, pour de multiples raisons sur lesquelles la physique peut avoir un impact. Par exemple, la perte de propriétés du matériau recyclé, qui mène à une utilisation dégradée (décyclage) non souhaitée, pose des questions physico-chimiques intéressantes en termes de lien structure-propriétés pour des mélanges ; il en est de même pour la question de l'harmonisation et de la simplification de la formulation des matériaux (plastiques par exemple) qui bénéficierait à être davantage vertueuse en termes d'empreinte environnementale. L'amélioration des méthodes de tri nécessite aussi une meilleure identification des matériaux. Par ailleurs, en ce qui concerne les polymères, des espoirs sont soulevés par le recyclage chimique ou enzymatique en termes de circularité, posant de nouvelles questions scientifiques, mais aussi environnementales.

L'économie des ressources passe par le respect de la hiérarchie des modes de traitement des déchets: donner la priorité à la prévention et à la réduction des déchets, développer le réemploi, la réutilisation/réparation puis inciter au recyclage. Il est donc intéressant de remettre la problématique du recyclage dans le contexte systémique plus général de production-usage-fin de vie des matériaux au lieu de considérer seulement la question du déchet une fois apparu. La demande sociétale est forte pour de la recherche regroupant sociologues, économistes et physicien·nes sur ce sujet.

URBAIN

La population mondiale est vieillissante et en forte croissance, avec un exode rural marqué (2,5 milliards d'habitant·es en plus dans les villes entre 2018 et 2050), induisant une forte demande en construction neuve. En France, en revanche, avec la dynamique actuelle, 70 % des bâtiments présents en 2050 auront été construits avant 2012 (1^{re} régulation thermique). Dans un contexte de recherche de neutralité carbone, sobriété et minimisation des impacts environnementaux, l'urbain se retrouve confronté au changement climatique (changement aussi du microclimat ressenti par l'habitant·e dans son quartier) et à une amplification des événements extrêmes (en intensité comme en fréquence, et pouvant se produire de manière concomitante). La R&D (0,1 % du chiffre d'affaires dans la construction et 0,01 % dans les travaux publics) est rarement abordée tout au long de la chaîne de valeur par les acteurs de la construction, car cette chaîne est très fractionnée, notamment légalement.

Du fait de la structure du patrimoine bâti en France, l'accent doit porter sur la rénovation (thermique notamment), mais la construction neuve reste importante. Il faut rendre l'acte de construire plus fiable ; à savoir, permettre d'obtenir un résultat conforme aux attentes. Les approches de type économie circulaire, bien que confrontées à de nombreux freins, bénéficieraient à être systématisées.

À l'échelle urbaine se pose la question du bien-être des habitant·es, qui nécessite de s'intéresser à la climatologie urbaine (qu'il faut mesurer et modéliser) et à la pollution urbaine (qualité de l'air, sources d'aérosols primaires et secondaires), ces deux aspects étant en lien avec la santé publique et la sûreté des infrastructures. La climatologie urbaine est multi-échelle en espace (on est intéressé par le microclimat devant chez soi) comme en temps (évolutions sur 50 ans, climats moyens et climats extrêmes...). À l'échelle urbaine se pose également la question de la logistique urbaine en lien avec les flux et plus globalement la mobilité. La ville est synonyme d'énormes quantités de matières (structures en béton notamment) et de surfaces (surfaces des bâtiments, des routes) : peut-on fonctionnaliser ces volumes (on parle déjà de bétons conducteurs pouvant stocker de l'énergie) et ces surfaces pour leur donner un rôle actif ?

L'urbain impacte la nature, mais on s'intéresse de plus en plus à l'impact de la nature sur l'urbain : évolution des sols avec le changement climatique (la contraction des sols argileux endommage le bâti), le CO₂ atmosphérique carbonate les matériaux cimentaires (ce qui permet de capter ce CO₂), la végétalisation impacte les performances thermiques des bâtiments. Les bâtiments sont constitués d'enveloppes et de parois, garants du confort intérieur, mais lieux d'échanges thermiques, hydriques... Ces parois sont complexes (multimatériaux, multi-échelles, un comportement au vieillissement mal compris à ce jour) et la maîtrise de leurs propriétés thermo-hydriques est primordiale pour assurer confort intérieur et sobriété énergétique.

Un enjeu important pour les bâtiments est la mesure de leur performance (énergétique, en termes d'émissions, de régulation d'humidité...) qui est un préalable nécessaire à toute rénovation. Cette question de la mesure est également pertinente pour le contrôle des ambiances intérieures.

Les matériaux sont à la base de toute construction. Grâce à l'apport de la science des matériaux, qui est passée de l'empirisme à l'IA et à la science de la donnée, on cherche à développer de nouveaux matériaux de construction (géo-sourcés, bio-sourcés, bétons bas carbone...) moins impactants environnementalement. Cependant, les matériaux ne peuvent être pensés pour eux-mêmes mais avec leur mise en œuvre et le système constructif dans lequel ils s'intègrent. Ainsi de nouveaux procédés de construction se développent, tels l'impression 3D (de matériaux cimentaires, à base de terre) qui amène des

problématiques rhéologiques complexes. On note également les difficultés techniques associées à la réutilisation des déchets (par exemple, le Grand Paris produira 400 Mt de déblais d'ici 2030) comme terre de construction. De même, le réemploi de systèmes constructifs, par opposition au recyclage, permet de garder la fonctionnalité du système initial.

Avec l'engouement pour les matériaux géo-sourcés (la terre) et bio-sourcés (le bois, les bétons à fibres ou granulats végétaux...) viennent de nouveaux enjeux. On notera la variabilité de ces matériaux (imposée par la volonté de circuits courts et d'adaptation aux ressources disponibles, ou par la présence de défauts structurels dans le bois) et les problèmes de durabilité (forte sensibilité à l'eau pour la terre, traitements physico-chimiques pour le bois). Pour les matériaux bio-sourcés, on notera la difficulté à garantir les performances sans répéter des campagnes expérimentales fastidieuses (pour chaque nouvelle essence d'un matériau bio-sourcé, il faut refaire les études). Pour la terre, caractériser les performances du matériau sur site est aussi un défi. Malgré l'intérêt pour ces matériaux, le béton gardera un rôle central dans l'urbain, car il est le seul pouvant être produit en quantités suffisantes pour répondre aux besoins de la construction. Ultra hiérarchisé, sa structure n'est pas encore comprise à toutes les échelles (du cm au nm). Pour diminuer son empreinte carbone, des efforts doivent être réalisés le long de la chaîne de valeur (nano-concevoir les hydrates, réduire les quantités de ciment dans le béton, optimiser l'usage pour des constructions robotiques...), même si nous disposons déjà aujourd'hui d'une diversité de ciments plus ou moins bas carbone.

La thématique de l'urbain peut aussi s'aborder avec les outils de la « physique urbaine ». On peut voir la ville comme un système qui s'étale, avec sa texture, sa surface et ses assemblages urbains. La ville est aussi un générateur de données, dont la physique peut aider à raisonner l'acquisition et l'utilisation, en lien avec les jumeaux numériques. On peut voir la ville par le prisme de l'énergie (création, conversion, dissipation, bilan énergétique), comme un matériau poreux et un réseau de rues (pour y étudier le transport), comme un réseau d'infrastructures aériennes et souterraines, voire comme un réseau de réseaux (pour aborder les questions de stabilité et de redondance). La ville est en tout cas un objet fortement pluridisciplinaire, dont l'étude nécessite une interaction entre les sciences dures et d'autres disciplines, notamment les économistes, les géographes et sociologues ou les spécialistes du vivant (liens homme-nature). De toute évidence, elle nécessite également une interaction entre science et ingénierie. Les nouvelles réglementations, comme la réglementation environnementale RE2020 invitent à de telles interactions systématiques.

ALIMENTATION

Depuis soixante-dix ans, la production agricole et alimentaire a considérablement augmenté sous l'effet conjugué

de la croissance démographique et économique et de l'évolution technique et culturelle des pratiques agricoles. Bien qu'il soit largement reconnu que les pratiques intensives développées ont permis d'éviter des pénuries alimentaires à grande échelle, elles sont aussi extrêmement critiquées pour avoir conduit à une perte sans précédent de la biodiversité, à la consommation non soutenable des ressources naturelles (sol et eau) et à une dépendance renforcée de l'agriculture aux ressources fossiles. Les impacts écologiques sont tels que, combinés au vieillissement de la population et à la diminution du nombre des agriculteurs, on constate une baisse de la production agricole dans certaines régions du monde et une augmentation de la prévalence de régimes pauvres en nutriments, représentant un danger pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle mondiale. La malnutrition avec ses deux composantes que sont d'un côté l'épidémie d'obésité et de maladies chroniques associées et de l'autre la faim, conséquence de la sous-alimentation, ne cesse d'augmenter. À cela s'ajoute la compétition sur l'usage des terres pour produire de l'énergie décarbonée à partir de la biomasse agricole.

Les systèmes actuels sont donc non soutenables. De plus, ils manquent de résilience avec des risques de ruptures dans les approvisionnements alimentaires, comme l'ont montré les chocs récents qu'ont été la crise du Covid 19, la guerre en Ukraine et l'intensification des événements climatiques extrêmes. Ce tableau noir ne serait pas complet si l'on omettait de signaler que les pertes et les gaspillages de la production à la consommation en passant par la transformation et la conservation sont de l'ordre de 30 %. Par conséquent, les défis à relever sont de développer des systèmes alimentaires sains, durables et accessibles à tous alors que le changement climatique va intensifier les risques et que dans le même temps la population continue de croître, de s'urbaniser et de vieillir. Dans ce contexte, comment faire pour que les transitions nécessaires à mettre en œuvre favorisent et sélectionnent des systèmes alimentaires sains et durables ?

Il y a un consensus autour de la nécessité :

- 1) de changer les régimes (diversification des protéines, notamment végétales) et les comportements alimentaires ;
- 2) de changer nos modes de production et de transformation ;
- 3) d'agir sur la gouvernance des systèmes alimentaires.

Les consommateurs et consommatrices sont aussi partie prenante, promouvant de nouveaux comportements alimentaires et demandant toujours plus de spécificités aux produits commerciaux. Les verrous à lever sont autour de la conception raisonnée des aliments. Un premier volet porte sur les relations structure-fonctionnalité des aliments : importance des organisations supra-moléculaires et des propriétés interfaciales, origines microscopiques des propriétés rhéologiques et sensorielles, requérant des approches multi-échelles en milieux complexes. Un second volet doit couvrir les procédés de transfor-

mation afin de maîtriser les structures physiques à différentes échelles et la réactivité chimique tout en étant moins consommateurs d'eau et d'énergie. Cela ne pourra se faire sans une compréhension fine *operando* des phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent au cours des différentes opérations unitaires. Enfin, un dernier volet devra porter sur les interactions aliments - humain avec une meilleure connaissance des mécanismes de déstructuration des aliments dans le tractus digestif, afin d'améliorer leur reformulation pour une meilleure biodisponibilité.

Dans une vision plus systémique, il est nécessaire de favoriser une utilisation plus optimale des matières premières afin d'éviter les pertes, d'utiliser les co-produits, de recycler les effluents et les déchets, et d'organiser les usages en cascade entre production d'aliments, de matériaux (emballages, matériaux pour le bâtiment, tissus techniques) de molécules (peintures, adhésifs, produits pharmaceutiques et cosmétiques...) et d'énergie. Enfin la santé de l'homme est indissociable de celle des animaux et des écosystèmes (santé globale). Des verrous majeurs ont été identifiés autour des mesures et de la modélisation des systèmes adaptatifs complexes présents dans les écosystèmes tels que dynamiques de propagation des maladies et de leur transmission à l'homme, dynamiques de coévolution micro-organismes/organismes (par exemple, hôte-parasite), réponse du vivant au stress environnemental et changement climatique (énergétique du vivant, migrations), interactions biodiversité-écosystème-humain, remédiation frugale pour une santé globale (innovations technologiques, réduction intrants, phyto-remédiation).

DU SYSTÈME MODÈLE AU SYSTÈME RÉEL COMPLEXE : QUELLE PHYSIQUE ?

Que ce soit sur les sujets urbains, d'environnement ou d'alimentation, des thèmes transversaux, similaires en termes de physique, sont apparus et nous les avons organisés dans la suite selon trois grands champs volontairement assez larges. Les questions de physique posées peuvent parfois paraître classiques, mais c'est l'application de cette physique à des systèmes réels en évolution qui poussera les physicien·nes dans leurs retranchements.

TRANSPORT, DYNAMIQUE, TRANSFERTS ET ÉCOULEMENTS EN MILIEUX COMPLEXES, DÉSORDONNÉS, HÉTÉROGÈNES, MULTIPHASIQUES

Le premier axe transverse qui se dégage fortement est lié à des questions émergentes sur les transports et écoulements dans des milieux complexes, en considérant des cas réalistes : structures hétérogènes du milieu, présence de défauts, d'interfaces entre des milieux différents, de parois et de bords. De plus, ces milieux ne sont généralement pas à l'équilibre, ils évoluent dans le temps et leurs propriétés sont couplées aux flux de matière, de chaleur, etc., les traversant.

Environnement

En termes d'environnement, beaucoup de ces questions sont liées aux sols. Le sol est effectivement un milieu complexe, multicouche, poreux et le siège de phénomènes de transport de fluide et de chaleur. Qui plus est, c'est un milieu en constante réorganisation physique, à cause de la présence de micro-organismes, de vers et autres petits animaux et du réseau racinaire des végétaux. Ceux-ci induisent des réactions chimiques et le transport de molécules organiques simples ou plus complexes que sont les enzymes et les nutriments. En matière de physique, Il s'agit d'abord de mieux comprendre le transport de l'eau dans ces milieux poreux plus ou moins saturés, et au-delà, l'étude du transport réactif dans les sols devra se développer, pour prendre en compte réactions chimiques, effets biotiques et potentiels changements de phase associés aux flux. La recherche se tourne aussi vers le couplage entre les eaux de surface et la nappe souterraine et l'influence des structures géologiques, en lien avec les problématiques d'inondation et de manque d'eau. À une échelle plus fine, il est important de comprendre comment ces flux sont pilotés par les dynamiques hors d'équilibre aux interfaces roche/eau/air. Un autre axe émergent consiste à déterminer les propriétés effectives d'un sol ou d'une couche rocheuse, par exemple la perméabilité, uniquement à partir d'images 3D (*digital rock physics*). Le transport de l'eau est aussi lié à des questions de séchage ou d'imbibition en milieu granulaire, ce qui se relie à la problématique du gonflement des argiles et de la rétention d'eau, qui seront des questions importantes dans les années à venir.

Une autre grande problématique est l'appauvrissement des sols, qui menace tout l'équilibre de la santé globale. Comprendre l'ensemble des mécanismes biotiques et abiotiques à l'œuvre dans un sol permettra d'améliorer les techniques de remédiation des sols qui ont besoin d'approches innovantes. L'idée de « bio-augmentation » i.e. de promouvoir le microbiome pour une optimisation des fonctionnalités physiques du sol (propriétés mécaniques, flux, capacité de rétention) en est à ses débuts. Pour le transport de l'eau, l'idée est ainsi de le contrôler en modulant les propriétés du sol (plus hydrophile, plus sec, plus poreux...). De même, l'utilisation de plantes pour nettoyer les sols pollués par extraction minière (éco-catalyse) se développe et pourra bénéficier d'une meilleure compréhension des échanges entre le sol et les racines.

Dans d'autres domaines pratiques liés à l'environnement, on retrouve ces questions d'écoulement et de flux en milieu hétérogène. Par exemple, il existe des problématiques d'hydrodynamique des boues d'épuration et du couplage avec l'évolution de leur population bactérienne, ce qui joue un rôle sur l'amélioration des stations d'épuration et du traitement de la pollution des sols. De même, pour le traitement des déchets, une question ouverte est la prise en compte des hétérogénéités du mélange dans les réacteurs pour méthanisation. Dans le domaine du recyclage mécanique, et le traitement des déchets en général, se posent de nombreuses questions de transfert de chaleur

et d'écoulement en milieu complexe, dont la compréhension permettrait d'améliorer les procédés actuels.

On retrouve aussi ces questions de transport dans l'étude des océans. Fondamentalement, les objectifs sont de comprendre comment l'océan absorbe et transporte la chaleur, comment cela met le fluide en mouvement, et quels sont les cycles et flux de matière dans l'océan (incluant ce qui transite par le vivant, par exemple, le transport vertical de micro-organismes dans la colonne d'eau). Par ailleurs, on sait aussi que les sols, l'océan ou encore les plantes sont des puits de carbone et là encore des questions sur la dynamique du transport sont à résoudre.

Dans le futur, l'étude des écoulements sur les lits et bordures des rivières va aussi se développer ; on cherche à comprendre comment l'érosion locale, les éboulements et la dynamique de gros objets emportés peuvent avoir un impact sur le flux de la rivière et sur son possible débordement. Dans la même logique, un axe émergent aujourd'hui est aussi l'étude de la zone littorale et de l'érosion du trait de côte par la mer, notamment pour mieux comprendre l'impact d'événements extrêmes sur ces frontières naturelles, pour proposer des solutions à la montée du niveau de la mer dans un cadre plus général sur les interactions ville - mer. Cela rejoint aussi des questions toujours ouvertes sur les éboulements et glissements de terrains. En parallèle du transport d'un milieu à un autre, le frottement à une interface est aussi un domaine de recherche à promouvoir. Cette physique du frottement (tribologie) se développera autour de questions sur les contacts électriques rapides (routes électriques, avec caténaires), l'usure des pneus sur la route, le contact roue-rail, particulièrement critique pour gérer la production de résidus et particules et pour éviter des pollutions de l'air.

Urbain

Dans un bâtiment, les parois, murs et séparations se caractérisent par leur aspect multi-matériaux, multi-échelle, présentant des discontinuités et un comportement vieillissant. Un défi actuel est de comprendre les dynamiques de transport dans ces milieux poreux multicouches, d'autant plus complexes que certains matériaux (biosourcés, géosourcés) présentent une forte variabilité. Il s'agit ici principalement d'échanges thermiques ou hygro-thermiques que l'on cherche à maîtriser pour assurer le confort hiver comme été (notamment en périodes de canicule) en minimisant les impacts environnementaux. La porosité multi-échelle des matériaux de l'urbain contrôle leur échange hydrique et globalement leurs propriétés thermiques, (poro -) mécaniques et de vieillissement impactant directement la durabilité des ouvrages.

Toujours pour atteindre cet objectif de confort sobre, pour les rénovations comme pour les bâtiments neufs, on devra aussi repenser et piloter au mieux les flux d'eau et d'air, par exemple par ventilation passive. Sur ce sujet comme sur d'autres, les approches basées sur le biomi-

métisme (par exemple les termitières pour une ventilation passive dans les bâtiments) sont à l'étude.

À l'échelle du bâtiment se pose la question de la mesure de l'ensemble des échanges avec l'extérieur, des impacts environnementaux (émissions) du bâtiment, de sa performance, tout au long de son cycle de vie. On pense ainsi aux échanges (de fluide ou de chaleur) entre le bâtiment et son sol (géothermie appliquée aux bâtiments). D'autres défis sont de récupérer la chaleur émise par les bâtiments. Peut-on produire de l'électricité à partir du rayonnement infrarouge du bâtiment? Les questions de rayonnement se posent aussi pour les arbres: comprendre comment ils rayonnent est nécessaire pour bien évaluer l'effet des arbres sur la température et l'atmosphère urbaines.

La pollution de l'air, notamment en milieu urbain, est aussi un sujet de recherche qui implique de nombreuses questions de flux et de transport dans des milieux complexes: on a besoin de mieux comprendre les flux dans des milieux confinés comme les réseaux de métro. Un autre défi actuel est de déterminer la réelle portée des aérosols dans les écoulements d'air et leur transport en milieu urbain (aéro-contamination). La ville est aussi le lieu de pollutions sonores et lumineuses contribuant à détériorer l'ambiance urbaine. Il s'agit d'un problème de propagation d'ondes en milieu urbain qui relève clairement d'une approche physique, en lien également avec des questions de transfert, d'écoulement de l'air, et de matériaux dont est faite la ville.

Enfin, le thème des flux et écoulements en milieu complexe, appliqué à la ville, inclut également des questions de déplacement de personnes et de véhicules. Répondre aux défis posés implique des approches physiques pouvant notamment s'appuyer sur une analogie avec les écoulements en milieux poreux ou avec les colloïdes actifs. Toujours dans cette approche par analogie, des recherches se développent sur la ville comme un ensemble d'interfaces, avec des notions d'auto-assemblage, de structuration à différentes échelles démontrant la pertinence d'analyser la ville avec des lois physiques.

Alimentation

Les questions de transports, de matière, d'eau, de gaz et de leur dynamique à différentes échelles (nutriments, macromolécules, contaminants, micro-organismes...) traversent le domaine de l'alimentation depuis l'agriculture jusqu'aux produits consommés. Ainsi la pollution des sols impacte directement les aliments que nous mangeons (qui sont d'ailleurs aussi contaminés par voie aérienne), et comprendre le transport des polluants et leur transfert dans le végétal est une question qui prend de plus en plus d'importance.

De même, la production de produits déshydratés contenant un minimum d'eau est un axe de recherche nécessitant une compréhension fine de la physique du séchage et de la lyophilisation ainsi que des mécanismes du transport de l'eau pour leur réhydratation (cas des poudres en particulier).

On retrouve aussi des questions de transfert de gaz en lien avec les emballages alimentaires, dont on cherche à ajuster la perméabilité, et à comprendre le rôle des charges nanométriques incorporées. Le transport de matière dans les installations industrielles alimentaires pose aussi des questions de physique aux interfaces dans le cas d'encrassement, de colmatage de filtres, avec le besoin de trouver des processus physiques permettant d'agir *in situ*. La présence de surfaces solides dans ces installations implique aussi des problématiques d'adsorption (de microorganismes, de bactéries...), possiblement contrôlables par une texturation originale des surfaces. Pour ces micro-organismes en interaction avec des substrats, produisant des biofilms, on retrouve aussi des questions de transport et de dynamique hors équilibre: quelle croissance et motilité de bactéries en présence de flux externes, quels mécanismes de diffusion d'enzymes dans un biofilm? Similairement se posent des questions sur la motilité de bactéries dans des biofluides (digestifs notamment) et sur les mécanismes de rétroaction sur la rhéologie de ces biofluides. Ces systèmes hors équilibre et désordonnés sont fortement pilotés par la présence d'interfaces entre différents fluides et par les échanges que cela entraîne. Parmi les questions émergentes, on retrouve celles liées à l'encapsulation (simple ou multiple) et le relargage (spontané ou déclenché). Il s'agit aussi de développer de nouvelles matrices alimentaires, aux propriétés adaptées pour des consommations spécialisées (seniors, aliments pour conditions extrêmes), tout en ayant la meilleure biodisponibilité, ce qui requiert une connaissance des structures et de leur cohésion.

PHYSIQUE MULTI-ÉCHELLE TEMPORELLE ET SPATIALE: COUPLAGES, INTERACTIONS, RÉSEAUX ET TRANSITIONS

Les systèmes réels sont généralement hiérarchisés en taille et mettent en œuvre des phénomènes à des échelles de temps variables. Cela impose des approches multi-échelles pour déterminer les liens entre propriétés microscopiques et macroscopiques. Les défis sont alors liés à la compréhension des couplages et boucles de rétroaction existants entre chaque échelle de taille et de temps. De plus, il reste des tailles et temps caractéristiques qui n'ont pas été explorés et qui sont des chaînons manquants pour construire une vision globale. Cette approche multi-échelles et ces couplages renvoient vers les problématiques de réseaux complexes, très présentes dans nos thématiques. Enfin, nous y associons aussi les problématiques de transition de phase, de stabilité/instabilité; des concepts génériques en physique qui sont ici reliés à ces organisations multi-échelles spatiales et temporelles.

Environnement

Dans les sols et couches rocheuses, une question récurrente également de type multi-échelles est de comprendre les propriétés macroscopiques à partir des interactions à l'échelle des grains. À l'heure actuelle, passer de l'échelle du pore et d'une description discrète aux pro-

priétés du continuum macroscopique reste complexe. En termes temporels, l'objectif est de comprendre certaines transformations du sol à l'échelle du jour ou de l'année, à partir de flux qui ont lieu à l'échelle de la seconde. Les échelles spatiales du kilomètre à la centaine de kilomètres (sols dits « profonds ») sont encore peu étudiées. Cela rejoint des problématiques émergentes sur les couplages entre thermique et hydrodynamique dans les eaux et lacs souterrains, impliquant des gammes de paramètres peu usuelles. Dans les sols, un couplage à mieux comprendre est aussi celui entre diffusion et dégradation, notamment pour connaître le devenir des polluants. De même, un autre aspect multi-échelle (spatial et temporel) est celui qui relie les interactions sol-racines à la stabilité mécanique des arbres et leur résistance au vent, pour aller jusqu'à une compréhension de la dynamique des forêts, en lien aussi avec les questions de stockage du carbone. À ce propos, mesurer *in situ* des pressions et flux d'eau dans un arbre sur pied reste aujourd'hui un vrai défi technique.

En ce qui concerne les océans, les comportements à grande échelle sont mesurés et étudiés par les océanographes et on connaît aussi le monde du vivant à des échelles microscopiques. À ce stade, l'échelle de la « sous-maille », du mètre à la centaine de mètres, reste méconnue, notamment en raison de limitations d'instrumentation. À ces échelles, des couplages structure-écoulement seront à étudier ; par exemple l'équilibre dynamique entre auto-assemblage et fragmentation qui produit des radeaux d'algues et de plastiques à la surface de l'eau. Toujours sur des couplages et rétroactions, en termes de traitement des déchets, un axe de recherche vise à mieux comprendre comment optimiser les effluents de station d'épuration et les débits variables des rivières attenantes.

Quant aux transitions de phase, la physique du gel, pour des systèmes multiphasiques ou pour des cas pratiques comme des plantes/branches reste encore à comprendre ; de même, celles de l'aérosolisation ou de la dissolution de plastiques semi-cristallins, en lien avec la pollution. Des pistes originales proposent d'ailleurs d'appréhender ces processus de recyclage sous l'angle de la thermodynamique (entropie de mélange ou de séparation). Enfin, les nuages sont aussi une piste de recherche : on y retrouve des questions de transitions de phase, nucléation, croissance, contamination... plus ou moins spontanée ou induite (pour déclencher une pluie à volonté). Plus émergente est la problématique de la microbiologie des nuages, sachant que de nombreuses bactéries y sont présentes et sont ainsi transportées sur de longues distances.

Urbain

Dans le monde des bâtiments et la construction, une réflexion multi-échelle, allant du matériau jusqu'au quartier d'habitation, est aujourd'hui de plus en plus prônée. Cette réflexion est cohérente avec une vision systémique le long de la chaîne de valeur de la construction. En termes de couplage physique et pour lutter contre les pollutions,

l'objectif est de comprendre le transport des polluants et de la chaleur dans le milieu urbain ; en particulier, l'échelle de la rue semble aujourd'hui particulièrement importante à étudier, en 3 dimensions. Un objectif est de comprendre et minimiser les îlots de chaleur urbains. On évoque ainsi les notions de micro-météo ou de climatologie urbaine prenant en compte la topologie locale, les géométries dites de canyon, les turbulences dues aux bâtiments... Ces phénomènes sont complexifiés par la végétalisation des villes, qui nécessite de tenir compte des couplages entre cette micro-météo, la température des sols, l'albédo et l'évapotranspiration des végétaux.

La ville représente aussi une concentration de réseaux (énergie, transport, logistique) fortement couplés les uns aux autres. Une question émergente est de comprendre les réponses de ces réseaux couplés en cas de fortes perturbations ou d'événements rares. Parmi les questions entièrement ouvertes, on retrouve celle de la redondance versus l'optimisation, de la mesure de l'efficacité de réseaux « adaptables » vs « adaptés » ; des problématiques liées à la notion de résilience, au sens du retour à l'état d'équilibre d'un système après un choc (le vivant, redondant, est plus résilient que les systèmes optimisés comme les chaînes de production alimentaires ou d'approvisionnement des villes).

Alimentation

Une structuration multi-échelle se retrouve aussi généralement dans les produits alimentaires. Aujourd'hui, dans ce contexte de transitions alimentaires et d'émergence de nouveaux comportements alimentaires, des problématiques se posent par rapport aux nouveaux ingrédients (bio-sourcés, protéines d'origine végétale...), sur les liens entre structure moléculaire, assemblage supramoléculaire et fonctionnalités macroscopiques. Face à ces nouveaux ingrédients, il s'agit ici de revisiter des problématiques de stabilité à l'échelle colloïdale (micellisation, coacervation, agrégation), de solubilisation de protéines, de cinétiques de dissolution et de séparation de phases, tout en identifiant comment ces processus modifient la rhéologie macroscopique. La réponse des aliments face à des contraintes mécaniques est aujourd'hui aussi un sujet de recherche actif : on cherche à comprendre la déconstruction d'assemblages complexes lors de la mastication et de la déglutition (*oral processing*) et comment cela se relie à des notions sensorielles de texture. En parallèle, pour des raisons de santé, l'objectif est aussi de diminuer les quantités de sel, de sucre, de nitrites et autres stabilisants dans les aliments, ce qui se traduit par de vrais défis tant industriels que scientifiques en termes de stabilisation aux échelles supramoléculaires, si l'on veut garder les mêmes durées de vie des produits commerciaux. Toujours liées à la durée de vie, il existe aussi des questions importantes sur la physique de la congélation/décongélation des aliments.

Dans un cadre plus large, au niveau du monde vivant et de la santé globale, il existe aussi des problématiques nouvelles autour du multi-échelle, des couplages et des

réseaux, par exemple sur la dynamique complexe de réseau dans le cas de couplage plante/animal/climat, encore peu étudié par les physicien·nes. Le réseau hydraulique de l'arbre est aussi un sujet de recherche. Là aussi, on retrouve des questions de redondance, d'efficacité, de réponse à des contraintes extérieures (hydrique, thermique, mécanique) et de résilience. Les réseaux de mycorhizes sont aussi étudiés comme systèmes modèles, pouvant faire émerger des solutions bio-inspirées. Enfin, dans une démarche d'élargissement de la gamme des échelles de taille, il existe aujourd'hui des démarches innovantes visant, d'une part, à réfléchir sur une thermodynamique de la microbiologie (par l'identification de variables d'état, de relation d'état...) et d'autre part, sur une thermodynamique des organismes vivants de grande taille, pour par exemple connaître le « budget » thermique d'un animal et l'impact des changements climatiques sur son comportement. Aux échelles microscopiques des micro-organismes marins se pose aussi la question des écoulements pertinents à leur échelle avec la notion de micro-turbulence.

INSTRUMENTATION, DONNÉES, MODÈLES

Les perspectives en instrumentation sont d'abord fortement liées à une demande de capteurs, notamment de capteurs à bas coûts (*low-tech*), miniaturisés, dispersés en grand nombre et permettant des mesures en temps réel sur des temps longs. L'idée est de collecter plus de données, même si celles-ci sont potentiellement moins précises. Cette démarche pose aussi des questions de technologie de batteries et de suivi *in situ* ainsi que de matériaux pour les construire. En parallèle de l'expérimentation, les thématiques de notre atelier appellent à un effort croissant en modélisation et simulations numériques. Les simulations numériques, tout comme les capteurs, produisent de grandes quantités de données; la gestion, l'analyse de ces données, la validation des modèles sont autant de questions qui seront à prendre en compte. Inversement, les chercheurs font aussi part de problèmes d'accès à des données existantes, accès qui pourraient les aider à mieux modéliser, tandis que se posent des questions sur l'émergence de l'IA et des jeux numériques.

Environnement

La demande de capteurs miniaturisés, compacts, à longue durée de vie, sans pièces mécaniques, non polluants et dont le signal serait idéalement détectable *in situ*, est très présente en lien avec l'étude des océans. L'idée est de faire porter ces capteurs par des poissons, des oiseaux, des bateaux ou des déchets flottants, dans un contexte encore très exploratoire. Dans un autre domaine, pour la gestion des déchets, il est aussi proposé de mettre des capteurs dans nos poubelles pour en suivre toute l'évolution le long des chaînes de transformation.

Par rapport à la pollution de l'air, la conception et l'utilisation de constellation de nano-satellites est une solution émergente, permettant de suivre la qualité de l'air depuis

l'espace avec le besoin d'une analyse plus locale et plus résolue en temps (en complément des lidars). Cela s'appuiera aussi sur une utilisation nouvelle des nanotechnologies (nano photonique) dans les spectromètres imageurs.

Un autre aspect nécessitant de nouvelles approches en instrumentation est le suivi non intrusif d'infrastructures du bâtiment (pile de pont, centrale nucléaire...). Il existe aujourd'hui de vrais défis pour des instruments simples et portatifs permettant des mesures locales. De même, les pertes d'eau par fuite dans les canalisations sont typiquement de l'ordre de 30 % et, là aussi, capteurs et instrumentation originales ont besoin d'être développés. En écologie, les modélisations numériques sont un outil déjà très utilisé; aujourd'hui, face aux défis climatiques, leur rôle peut devenir central. Toutefois, les chercheurs impliqués mettent en avant le besoin de plus de compréhension physique, à la fois pour valider les données d'entrée, les équations utilisées et les résultats obtenus aux différentes étapes de calcul. L'objectif de diminuer les erreurs/incertitudes des modèles est rendu plus difficile par la présence plus fréquente de régimes extrêmes s'accompagnant de données également moins précises (par exemple seulement des « trajectoires » d'émission de CO₂). Il apparaît aussi nécessaire d'organiser la mise en commun des modèles dans le cadre d'une dynamique collective internationale (type GIEC pour le climat). Enfin, une approche de physique semble indispensable pour calculer la vraie empreinte carbone d'un objet, d'un aliment ou d'un procédé et ainsi produire des comparatifs raisonnés.

Urbain

Les thématiques de la ville et du bâtiment requièrent aussi une utilisation plus grande de capteurs avec également une contrainte de sobriété numérique relative à l'acquisition et au stockage des données; là aussi, en temps réel, à bas coûts et miniaturisés. Ce qui est plus spécifique au fonctionnement de la ville est l'idée de capteurs sur les personnes, pouvant se servir de leurs déplacements pour acquérir des données sur les conditions locales de la ville (pollution, température...), potentiellement sur des temps longs (utile pour un suivi sanitaire). Cette approche présente bien sûr des limites, notamment liées au fait que les personnes savent qu'elles participent à prendre des mesures. Il est par ailleurs possible de développer d'autres capteurs servant à objectiver le jugement humain, comme cela se fait pour le goût de l'eau ou des tests de confort. Encore d'autres capteurs sont en développement pour permettre aux personnes seniors de rester aussi longtemps que possible à leur domicile, en se basant sur des données objectives (sur l'activité physique, la consommation de nourriture, le sommeil, etc.).

Pour mieux connaître les pollutions, il est aussi important de caractériser plus finement les nouveaux polluants, notamment les aérosols et nano-particules; il s'agit ici de mesurer autant la taille que la forme et la nature de ces aérosols et nanoparticules, ce qui nécessite des travaux d'instrumentation. L'interaction avec des médecins semble importante pour déterminer quels paramètres

sont pertinents pour la nocivité, en ce qui concerne ces particules dites ultrafines. En termes de simulations numériques, la ville est l'objet d'une utilisation croissante de modélisations par des jumeaux numériques. Il semble là encore très important de ne pas négliger la compréhension des mécanismes en incluant dans ces recherches la contribution de physicien·nes et des méthodes de la physique pour simplifier et ne retenir que les paramètres pertinents pour des modèles efficaces, prédictifs et numériquement sobres.

Alimentation

Dans cette thématique, le besoin en capteurs est fortement relié à l'idée d'avoir des outils utilisables sur place : il s'agit de pouvoir mesurer en direct dans un champ, dans une exploitation agricole... pour tous les aspects alimentation et santé des animaux, mais aussi d'avoir des capteurs « en ligne » dans les chaînes de production pour un suivi des produits *in situ*. Dans le même esprit, mesurer la qualité des réserves d'eau douce devra aussi pouvoir se faire avec des techniques innovantes, portatives et frugales, pour détecter les éventuels contaminants. L'innovation en instrumentation repose aussi sur des techniques qui vont permettre de sonder la structure des aliments (par exemple, IRM), et permettre l'analyse de leur composition (là encore pour détecter des polluants ou additifs).

Pour le vivant et à des échelles microscopiques, les techniques de microscopie permettent de voir les cellules individuelles. Mais il serait utile de développer dans le futur des techniques de mesures simultanées des champs de concentration d'espèces chimiques, avec pour objectif de comprendre la communication chimique entre cellules et d'en suivre la dynamique. Les procédés alimentaires peuvent aussi bénéficier de simulations numériques, par exemple pour aider à comprendre les couplages et transferts thermiques dans les échangeurs, en prenant en compte l'effet de parois, du confinement, des gradients de concentration et de température, de sorte à déterminer leur influence sur la rhéologie locale, et finalement de développer des procédés éco-conçus.

CONCLUSIONS

LA PHYSIQUE A TOUTE SA PLACE...

Lors de nos entretiens avec des expert·es, nous avons clairement identifié que la physique, par ce qu'elle apporte de spécifique, peut jouer un rôle important dans les problématiques de l'alimentation, l'environnement et l'urbain. Par exemple : identifier les questions sous-jacentes au problème et les poser en termes de physique, déterminer les mécanismes clés et hiérarchiser les paramètres pertinents, apporter une réflexion *a priori* en termes d'ordres de grandeur, de lois d'échelle, de dimensionnement, apporte une réelle plus-value dans ces recherches. La physique peut aussi permettre de développer de nouvelles méthodes d'analyse de données, d'apporter une capacité prédictive et d'universalité via la modélisation et de donner du sens aux variables pour une compréhension des phénomènes.

Au cours des entretiens avec des expert·es aux spécialités variées, il est apparu qu'intégrer cette démarche dans leurs projets leur semblait très pertinent.

... MAIS DANS L'INTERDISCIPLINARITÉ

Toutefois, il est évident que l'approche du physicien·ne ne résoudra pas seule ces questions et la recherche conjointe avec d'autres disciplines est primordiale pour s'attaquer aux urgences liées aux thématiques de cet atelier. Notons d'abord que cette ouverture peut déjà s'amplifier à l'intérieur même du champ de la physique, dans une démarche dite « multi-physique » mêlant les différentes spécialités en physique (hydrodynamique, thermique, mécanique, acoustique, etc.). À l'interface avec d'autres disciplines, le besoin de physique pour optimiser les campagnes de mesures, identifier les mécanismes pertinents, se fait notamment sentir dans les champs de la biologie et de l'océanographie. L'interface physique-médecine présente aussi des opportunités intéressantes (instrumentations communes, analogies possibles, par exemple cerveau et milieu poreux). De même, la science de la durabilité semble être aujourd'hui largement portée par l'écologie, et plus de physicien·nes pourraient y participer. Les liens avec les sciences humaines et sociales restent complexes, en raison d'écarts culturels forts, quoiqu'il nous ait été clairement rapporté que ces aspects sont cruciaux pour que les innovations puissent aboutir et exprimer tout leur potentiel. Ici, la physique pourrait notamment aider en clarifiant des métriques communes, ou en co-développant des approches orientées « objet » (par exemple, la rue comme objet d'étude). Une démarche combinant sciences sociales avec physique, informatique et mathématique pourrait aussi se développer, par exemple dans le cadre de la ville avec des *urban science institutes*, ce qui permettrait de prendre en compte l'aspect systémique des problèmes qui s'y posent. Les freins et limites intrinsèques à l'interdisciplinarité sont connus, et pour les dépasser, il faut probablement tirer des enseignements de laboratoires existants dont les cultures interdisciplinaires se sont construites au fil du temps. Un laps de temps de plusieurs années semble nécessaire pour une appropriation par chacune des disciplines des questions pertinentes et des méthodologies de l'autre champ disciplinaire, et la présence de chercheur·ses ayant pour rôles de passer et traduire, pour expliciter les enjeux et concepts de chaque discipline, est aussi cruciale.

VERS UNE PHYSIQUE DES PROCÉDÉS ?

Notre atelier a aussi mis en avant le rôle important des procédés. Il semble pertinent de pousser cette interface entre physique et ingénierie sur la science des procédés, ainsi qu'en science des matériaux, en intégrant des approches permettant de caractériser les processus physiques, mécaniques et chimiques (lien structure-propriétés).

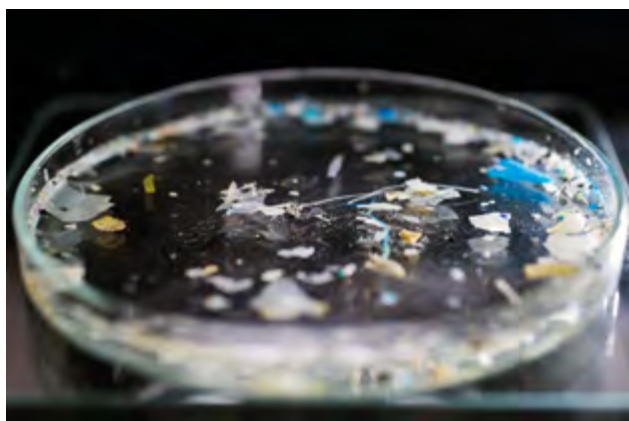
Les procédés suivants nous ont été mentionnés comme ayant des besoins d'optimisation (pour réduire l'énergie

consommée), de compréhension avancée et d'innovation : extraction (métaux lourds), micro-méthanisation en ville, broyage mécanique et micronisation (recyclage du béton), phyto-remédiation, pyrolyse, décontamination, séparation des métaux et déchets, extrusion, désalinisation, filtration, impression 3D (pour les matériaux de construction), échangeurs thermiques, et autres procédés bio-électrochimiques (piles microbiennes), avec comme objectifs essentiels d'économiser l'eau, la matière première et les intrants, tout en maintenant les rendements et les propriétés en sortie. La physique, par la compréhension des mécanismes sous-jacents, pourra aussi aider à résoudre les questions liées aux changements d'échelle (*scale-up* et *scale-down*), inhérentes à l'optimisation des procédés.

DATA ET MODÉLISATION

Sans répéter ce qui a déjà été écrit, nous souhaitons revenir ici sur quelques messages entendus lors de nos entretiens : il y a à la fois une demande de plus de capteurs, mais en même temps une crainte d'un excès de données générées, qui ne seraient pas forcément nécessaires, voire impossibles à traiter, et dont l'empreinte environnementale et énergétique pourrait être conséquente. Nous pensons que la physique doit permettre de rationaliser l'utilisation des données massives, et de promouvoir une sobriété des données et un usage raisonné de ces données. Il semble aussi que dans ce cadre, comme l'a notamment illustré la crise covid, il soit utile de former des spécialistes en statistique qui viendront en support des équipes de recherche. En pratique, il sera aussi important dans le futur de résoudre des problèmes d'interopérabilité de banques de données, de manière à pouvoir croiser des données socio-économiques, biologiques, médicales et physiques.

Il en va de même pour l'utilisation grandissante de jumeaux numériques, notamment dans la gestion de la ville et de l'utilisation de l'IA. Là encore, intégrer une approche physique doit permettre de valider, de mieux comprendre et de donner un sens physique aux résultats de simulations, ce qui sera crucial pour obtenir des prédictions plus pertinentes et une meilleure adaptation aux événements extrêmes par leur ampleur ou leur fréquence.



ALIMENTATION, ENVIRONNEMENT, URBAIN : DES EXEMPLES CONCRETS DE SYSTÈMES COMPLEXES DE GRANDE TAILLE INCLUANT UNE DIMENSION SOCIÉTALE

Nos entretiens ont aussi mis en avant un besoin de développer une vision systémique, prenant en compte toute une filière, en interdépendance ; par exemple, des matériaux du bâtiment au quartier (de part et d'autre du logement individuel), des déchets quotidiens au cours d'eau (de part et d'autre de l'usine de traitement des déchets), etc. De même, les concepts de redondance ou d'optimisation de réseaux, de robustesse et de résilience seront probablement de plus en plus prégnants dans les années à venir. Dans cette logique, les physicien·nes des réseaux peuvent jouer un rôle important. Ces systèmes réels impliquent aussi le facteur humain et économique, ce qui ajoute de la complexité et impose de trouver des compromis. Par exemple, le comportement des personnes joue un rôle central dans la propagation d'épidémies, ce qui pousse la modélisation dans ses retranchements, notamment en faisant émerger de nouveaux types de modèles dits à agents uniques, capables de prendre en compte des comportements plus spécifiques et réalistes.

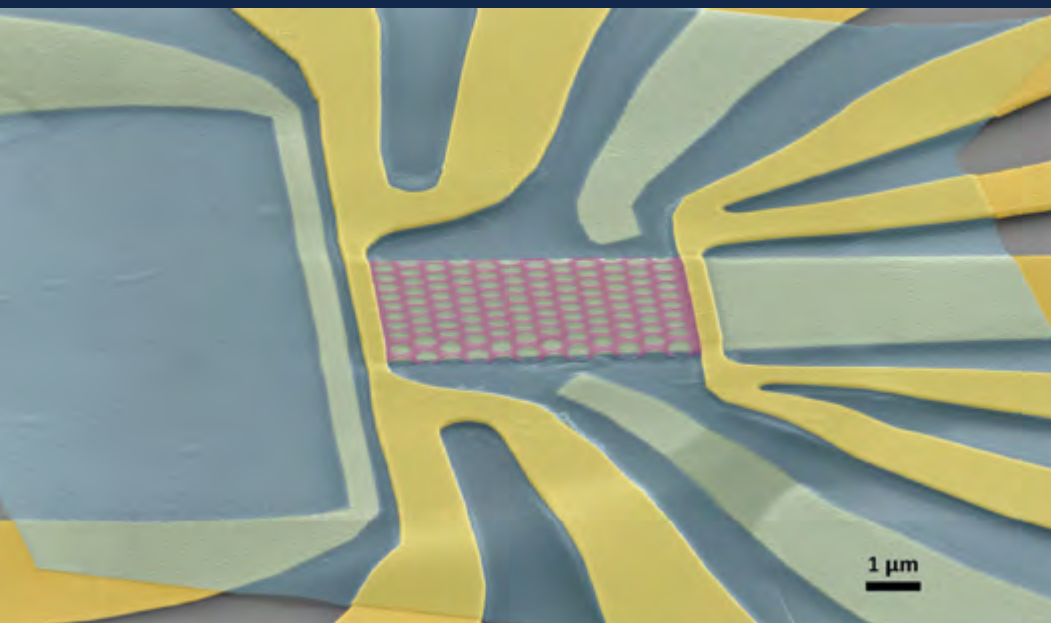
DÉCISION ET SOCIÉTÉ

Dans une société où l'aide à la décision pour les choix politiques et des consommateur·ices devient de plus en plus présente, les physicien·nes doivent prendre leur place parmi les économistes, les géographes, les sociologues dans les comités scientifiques consultés par des décideur·euses, afin que la vision des différents champs homme-matière-vivant soit complète. Ceci implique d'aller vers une physique des « écosystèmes mélangés » humain-nature. Par exemple, les GREC (Groupements Régionaux d'Experts sur le Climat) mêlent scientifiques et décideur·euses dans le but de partager la connaissance scientifique. La bonne échelle de ces groupes de travail est à déterminer, par exemple, celle de la ville car suffisamment concrète. Une autre approche est celle des *living lab* (pour mesurer « grandeur nature ») ou encore de la science participative, qui implique les citoyen·nes : l'identification de la position et taille de déchets via une application, ou des habitant·es finançant des thèses sur la pollution locale en sont des exemples.

Le mot de la fin de cet atelier est peut-être que la physique peut et doit montrer son efficacité et le rôle important qu'elle a à jouer dans la résolution des grands problèmes de société qui sont devant nous. En valorisant les produits de ses recherches, en donnant du sens à la science et en resserrant ses liens avec la société, elle ne peut que favoriser l'arrivée de jeunes chercheur·es vers sa discipline.

Morceaux de plastique isolés d'un échantillon d'eau de mer prélevé en Méditerranée.

© Cyril FRESILLON / OOV / LOV / CNRS Images



Les minces et les dodus dans la ville de FET : naviguer dans le labyrinthe nanomesh pour un avenir plus vert.
© Mehrdad RAHIMI / MPQ / Université Paris Cité / CNRS Images

Physique pour les technologies quantiques et les technologies numériques

RÉSUMÉ

Le numérique est aujourd'hui omniprésent dans notre société. Son usage croissant s'accompagne d'importants défis (diminuer l'empreinte environnementale, s'émanciper de certains matériaux, composants et logiciels critiques), qui devront être relevés d'une part en adaptant les technologies existantes, et d'autre part grâce à de nouveaux paradigmes, comme par exemple les technologies quantiques. Ces défis posent de très nombreuses questions de physique fondamentale qui relèvent de CNRS Physique, mais aussi des autres instituts du CNRS, des autres organismes de recherche, et des industriels. À travers nos entretiens avec un grand nombre d'acteurs de la communauté, nous avons identifié des enjeux à l'horizon 2030, déclinés pour les technologies quantiques et pour les technologies numériques, selon trois axes : (i) capteurs, imagerie et métrologie, (ii) communications, et (iii) simulation et calcul.

	Technologies quantiques	Technologies numériques
Capteurs, imagerie, métrologie	- Démontrer un gain quantique sur des cas d'usage - Développer de nouveaux supports pour la mesure - Mettre les capteurs en réseaux et montrer leur avantage - Développer des architectures embarquées	- Améliorer les sources MIR cohérentes - Développer l'imagerie THz - Intégrer les systèmes de détection - Assurer une opérabilité en environnement sévère
Communications	- Améliorer la technologie des composants élémentaires - Déployer des plateformes de test et des infrastructures - Consolider le lien entre des cryptographies quantique et post-quantique - Mettre en œuvre des protocoles pour réseaux quantiques	- Monter en fréquence - Inventer de nouvelles architectures d'antennes intelligentes, reconfigurables, directionnelles... - Accroître l'intégration photonique - Développer la convergence électronique-optique
Simulation et calcul	- Explorer différents types de qubits - Monter en échelle - Développer les codes correcteurs - Démontrer la valeur ajoutée de la simulation quantique	- Orienter l'électronique vers un développement plus durable - Transformer l'architecture technologique (neuromorphique...) et les composants (spintroniques, supraconducteurs, moléculaires...)

Des *enjeux transverses* de science fondamentale se font également jour : accroître la maîtrise dans l'élaboration des matériaux conventionnels et leur hybridation, promouvoir l'émergence de matériaux aux fonctionnalités nouvelles et innovantes, soutenir la recherche en technologie et nanofabrication, prendre en compte la convergence entre physique et intelligence artificielle.

Le numérique (météologie, communication et calcul) façonne et détermine de nombreux segments de l'économie. À l'ère de l'informatique distribuée, de l'internet des objets et des systèmes autonomes, le développement du secteur fait face à plusieurs défis : l'ampleur de la croissance de l'usage des technologies numériques, leur empreinte environnementale appelant à des filières et usages plus sobres, mais aussi l'émancipation à l'égard de certains matériaux, composants et logiciels critiques et stratégiques. L'explosion des flux de données à traiter, les interactions croissantes homme-machine, les exigences accrues en matière de protection et de sécurité des données, requièrent de fait non seulement une adaptation des technologies existantes, mais aussi des changements de paradigme dans la conception, la fabrication (incluant l'élaboration des matériaux), l'architecture et l'usage des composants, protocoles et systèmes. Le développement récent des technologies quantiques offre certaines opportunités prometteuses de ce point de vue, mais leur concrétisation demande encore des efforts en

recherche aussi théoriques que pratiques. Ces objectifs bénéficieront de l'apport des sciences fondamentales, en amont des prochaines innovations et des futurs besoins du secteur. La physique est au cœur de cette recherche au temps long, explorant des concepts nouveaux ou de rupture pour la mesure, les communications et le calcul.

TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Capteurs et métrologie, communication, simulation et calcul quantiques, sont des sujets qui mobilisent aujourd'hui un grand nombre d'acteurs de la recherche publique et industrielle. Ils sont au cœur du Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) « Technologies quantiques » de la stratégie nationale. Bien qu'orientées vers des enjeux applicatifs, les technologies quantiques relèvent encore très majoritairement de la recherche fondamentale. Les défis à relever sont importants avant d'envisager leur déploiement industriel. Ils sont ici déclinés par champs d'application.

CAPTEURS, IMAGERIE ET MÉTROLOGIE QUANTIQUES

La détection quantique fait usage d'un large éventail de matériaux, de phénomènes physiques et d'architectures de dispositifs. Elle permet de mesurer une grande variété de paramètres tels que les champs électriques et magné-

tiques, la température, le temps/fréquence, la pression et la contrainte, les forces inertielles, le déplacement et la phase. Les performances des capteurs et imageurs quantiques en termes de sensibilité, résolution, justesse, fidélité, largeur de bande ou gamme dynamique, leur permettent d'avoir un impact sur plusieurs domaines : navigation et maintien du temps, défense, géoscience, physique de la matière condensée et science des matériaux, imagerie biochimique et biomédicale, mais aussi science des interactions fondamentales (détection d'ondes gravitationnelles, test du principe d'équivalence, recherche de la matière noire, variation des constantes fondamentales). Si le développement des capteurs ou imageurs quantiques est encore en grande partie une question de recherche fondamentale, certains de ces dispositifs sont déjà sortis des laboratoires et font l'objet de développements par des entreprises. On peut ici indiquer par exemple les magnétomètres à centre NV, les horloges et gravimètres atomiques, les systèmes optomécaniques ou encore les amplificateurs micro-ondes supraconducteurs. Ceci fait probablement des capteurs quantiques l'axe le plus avancé des technologies quantiques en termes de maturité, avec un très bon positionnement des acteurs français académiques et industriels. Afin d'accélérer et d'amplifier le rôle de ces dispositifs, plusieurs défis doivent être relevés.

Faire progresser les performances des capteurs quantiques au-delà de leurs homologues classiques

L'enjeu n'est pas exclusivement un enjeu d'ingénierie. Par exemple, atteindre une sensibilité sous la limite quantique standard requiert le développement de méthodes nouvelles. Une voie possible repose sur la préparation et le contrôle avec une grande fidélité d'états corrélés tels que des états intriqués, protégés du bruit ambiant. Un autre enjeu porte sur le développement d'architectures et de méthodes offrant une plus grande polyvalence des capteurs et imageurs quantiques, en termes de conditions d'opération (température, pression, environnement bruyant...), d'encombrement et de modalités d'imagerie (imagerie multi-paramètres).

Développer et identifier de nouveaux supports quantiques pour la mesure

Les plateformes de capteurs ou imageurs quantiques recourent principalement aujourd'hui à des défauts à l'état solide (défauts de spin dans le diamant, spins moléculaires), des systèmes atomiques (atomes refroidis par laser et vapeurs atomiques), des systèmes supraconducteurs (interférences quantiques dans les SQUIDS, rupture de paires ou circuits quantiques pour le comptage de photons), des états photoniques non classiques (optiques, micro-ondes, ondes millimétriques) et des systèmes mécaniques dans le régime quantique (opto- ou électro-mécaniques). D'autres plateformes d'intérêt pourraient émerger, permettant des modalités d'imagerie nouvelles ou une meilleure compacité ou embarquabilité. On peut ici citer le développement de sources atomiques (sources continues, nouvelles espèces comme les alcalino-terreux)

ou bien les défauts optiquement actifs nouveaux dans le diamant (SiV, GeV, SnV) ou dans d'autres matériaux (SiC, matériaux 2D), ou encore le couplage entre magnons et centres NV ou photons de cavité. Une voie prometteuse repose sur l'hybridation de ces différentes plateformes, employant par exemple un résonateur mécanique couplé à une transition électronique (dans une boîte quantique, un centre NV, un ion de terre rare).

Développer des architectures compactes et embarquables, en lien avec les utilisateurs

Afin de combler l'écart entre les démonstrations en laboratoire et les plateformes déployables dans les applications, des schémas d'intégration des systèmes devront être mis en œuvre. Ceci requiert des progrès dans le contrôle des matériaux au cœur des plateformes, mais également dans l'intégration et la miniaturisation des composants associés (sondes, mais encore sources lasers, détecteurs). La compatibilité des technologies habilitantes (photonique, électronique, cryogénie) avec les applications finales sera cruciale pour valider le potentiel de valorisation des capteurs et imageurs quantiques. Un exemple est le développement et la maîtrise d'une cryogénie compacte et embarquable entre 0,5 et 80 K. L'adoption de ces dispositifs et l'identification de leurs cas d'usage ne pourront se faire sans un travail étroit avec les utilisateurs finaux, académiques ou industriels (géoscience, science des matériaux, spatial, défense).

Développer des architectures de capteurs en réseau

On s'attend à ce que les réseaux de capteurs interconnectés puissent améliorer leurs facteurs de mérite. Outre le développement de réseaux quantiques permettant de transférer l'information quantique entre capteurs distants, il conviendra d'identifier des cas d'usage dans lesquels la mesure d'observables reste inaccessible avec des capteurs individuels et/ou dans lesquels des tâches de détection distribuée pourraient bénéficier d'une architecture de réseau.

COMMUNICATIONS ET CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUES

La communication quantique permet le transfert de l'information quantique sur des longues distances à travers des infrastructures réseau. Elle repose sur des systèmes photoniques, idéalement dans des longueurs d'onde des télécommunications, qui maximisent la portée des liens quantiques. Les états quantiques ne pouvant être amplifiés sans bruit, la nature des nœuds d'interconnexion dans des réseaux quantiques est cruciale et détermine les fonctionnalités pouvant être réalisées. Avec des nœuds de confiance, il est possible de partager des clés quantiques garantissant une sécurité inédite pour le transfert des messages secrets sans limitation de distance ; avec des nœuds de type répéteur quantique, des perspectives d'applications très riches et largement inexplorées s'ouvrent, à l'instar de l'internet au début de sa création. Malgré des avancées importantes ces dernières années

et l'existence des systèmes commerciaux de cryptographie quantique, de nombreux défis doivent être surmontés pour envisager le déploiement d'une infrastructure de communication quantique à large échelle offrant des cas d'usage convaincants à l'horizon 2030.

Pousser les technologies des composants critiques, ainsi que leur miniaturisation et leur intégration

Les systèmes et les réseaux de communication quantique nécessitent des composants tels que des sources de photons uniques et intriqués, des détecteurs de photons uniques et des détecteurs cohérents, des commutateurs quantiques et des mémoires quantiques. Des transducteurs optique-micro-ondes et des interfaces ion-photon ou spin-photon s'ajoutent également à l'éventail de technologies qui doivent monter en maturité et en performances dans les prochaines années en se basant sur des plateformes variées. Il sera de plus important d'appliquer des méthodes d'intégration photonique et plus généralement de rendre les plateformes compactes et miniaturisées afin que ces composants soient compatibles avec une utilisation à grande échelle.

Déploiement de *testbeds* et d'infrastructures au niveau national

Le test et l'analyse comparative des technologies de communication quantique développées, suivant des critères bien définis et dans des conditions réelles d'utilisation, sont un élément clé dans le chemin vers leur maturité. Ceci inclut le test de l'interopérabilité des systèmes, des interfaces, de l'intégration réseau à la fois sur des liens terrestres et satellitaires, des diverses topologies et des protocoles de synchronisation. Ces efforts demandent une synergie étroite avec les industriels (télécommunications, spatial, défense) et doivent s'inscrire dans le cadre plus large de tels déploiements en cours en Europe et dans le monde.

Faire de la cryptographie quantique avec des boîtes noires

La question de la confiance aux utilisateurs, systèmes et nœuds d'un réseau quantique est au cœur de son utilisation pour une large gamme de cas d'usage. Un défi majeur dans ce contexte est de minimiser le plus possible les hypothèses nécessaires, permettant ainsi, dans ce modèle de type boîte noire, de certifier les processus même dans le cas de présence de parties malhonnêtes. Ce modèle permet de bénéficier au maximum de l'avantage intrinsèque en sécurité offerte par les technologies de la cryptographie quantique, mais impose de très fortes contraintes sur la performance. Il sera important d'explorer les compromis nécessaires et l'applicabilité des solutions envisagées, notamment pour la distribution quantique de clés.

Développer des protocoles avancés de réseaux quantiques

Dans la vision d'un développement progressif des réseaux quantiques, où l'intégration des technologies de plus en plus avancées (mémoires, répéteurs quantiques...) ouvre

la voie à des fonctionnalités de plus en plus complexes, la conception et la mise en œuvre des protocoles compatibles avec toutes les étapes de développement de ces réseaux sont nécessaires. L'intégration de la cryptographie quantique avec la cryptographie post-quantique doit se concrétiser. Les protocoles permettant l'accès à distance de façon privée et vérifiée à un processeur quantique, ou l'interconnexion de tels processeurs dans une configuration distribuée sont des exemples très prometteurs de services pratiques potentiels à développer à l'horizon 2030.

SIMULATION ET CALCUL QUANTIQUES

Depuis une vingtaine d'années, le contrôle des systèmes quantiques individuels a atteint un tel niveau de précision qu'il est envisageable de concevoir des processeurs utilisant les propriétés quantiques (superposition, intrication...) pour rendre possibles certains types de calcul. Les spectaculaires applications potentielles de ces processeurs ont conduit à un engouement sans précédent des acteurs privés et institutionnels pour mener à bien leur développement. Si les résultats obtenus sont très prometteurs, il semble très peu probable que des algorithmes de calcul quantique universel non simulables classiquement puissent être implémentés à l'horizon 2030. Il faudra encore répondre à un grand nombre de questions de physique fondamentale, notamment quant au développement de plateformes physiques adaptées à chaque application, et aux possibilités de développements technologiques permettant l'industrialisation réussie de ces processeurs.

Poursuivre l'exploration des systèmes physiques réalisant des bits quantiques (Tableau 1)

Différents types de systèmes physiques sont actuellement étudiés pour construire des processeurs quantiques. Plusieurs plateformes sont d'ores et déjà suffisamment matures en termes de fidélité et/ou de nombre de qubits pour être à la base de machines développées par des entreprises privées dans le monde entier : circuits supraconducteurs, ions piégés, atomes neutres, puces photoniques. De nouvelles approches, plus amont, sont par ailleurs explorées, comme les qubits de spin, les qubits à base de nanotubes de carbone, les hétérostructures hybrides supraconducteurs/ferromagnétiques ou supraconducteur/isolant topologique, les anyons dans l'effet Hall quantique fractionnaire, les skyrmions, ou les matériaux de van der Waals twistés. Il est important de soutenir la recherche académique sur ces plateformes au potentiel encore insoupçonné.

Relever les défis du passage à l'échelle

Les enjeux à l'horizon 2030 sont de nature différente suivant le degré de maturité des plateformes. Cependant, une difficulté commune à toutes les plateformes consiste à réussir le passage à l'échelle permettant de passer de quelques dizaines de qubits physiques (soumis à la décohérence) à des milliers, voire des millions de qubits logiques (préservés des erreurs). Un premier défi consiste

à assembler des centaines de qubits dans un processeur constitué d'un seul «cœur» (puce supraconductrice, semi-conductrice ou photonique, chambre à vide) avec des problèmes physiques de connectivité intra-cœur en limitant les *cross-talks*. Un second défi, sans aucun doute très important à l'horizon 2030, consiste à démontrer et à préserver en passant à une large échelle une fidélité de connexion suffisante inter-cœurs (interconnexion par fibre optique ou ligne de transmission micro-onde, ou entre différentes plateformes physiques suivant la fonction : mémoire, calcul, lecture...) pour que le processeur gagne en capacité de calcul par assemblage des cœurs.

Développer des codes correcteurs d'erreur quantiques

À la différence des processeurs classiques, la simple amélioration de la qualité des composants ne suffira pas à corriger toutes les erreurs pouvant affecter un calcul quantique universel. Les codes correcteurs d'erreur quantiques sont donc un champ de recherche crucial pour arriver à un processeur quantique. Il semble notamment important de travailler en synergie entre informatique et physique pour prendre en compte les limitations matérielles dans la création de codes correcteurs d'erreur avec une connectivité adaptée et bénéficiant des atouts des différentes plateformes physiques pour améliorer la fidélité des portes élémentaires. Différentes approches existent. Par exemple, les codes bosoniques sont une approche actuellement suivie avec succès dans les circuits supraconducteurs et les enjeux à l'horizon 2030 seront d'explorer les avantages et limitations des différents types de codes (qubits de chat, code GKP, *dual rail encoding*...).

Démontrer la valeur ajoutée de la simulation quantique en regard des approches numériques classiques

Le domaine de la simulation quantique, initialement focalisé sur la réalisation de hamiltoniens de matière condensée (modèles de spins, de Fermi-Hubbard, etc.), devient peu à peu, du fait de la programmabilité accrue de ces systèmes, pertinent pour certains types d'applications potentielles, que ce soit en chimie, en science des matériaux, en optimisation combinatoire. Une approche mêlant informatique et physique est nécessaire pour identifier et développer des algorithmes utiles, digitaux ou analogiques, tirant parti des spécificités des différentes plateformes NISQ (*noisy intermediate scale quantum*). Les enjeux du domaine à l'horizon 2030 restent l'extension de la simulation quantique à des dynamiques plus longues, la démonstration de l'existence (ou non) de cas d'usage pour lesquels l'utilisation d'un tel simulateur quantique programmable permettrait de dépasser les performances d'un calcul numérique classique (que la métrique de performance soit exprimée en termes de temps de calcul, de consommation énergétique, ou tout autre critère pertinent), la certification des résultats qu'une machine classique ne peut simuler. Une conséquence des développements de ces recherches est d'ailleurs le développement de meilleurs algorithmes classiques. En particulier, la physique numérique connaît des développements fulgurants pour la simulation de systèmes à N -corps, en partie nourris par les outils de la physique quantique comme les réseaux de tenseurs et les algorithmes de Monte Carlo stochastique, mais aussi par les techniques d'apprentissage machine.

Plateforme	Circuits supra-conducteurs	Ions piégés/atomes neutres	Photons	Boîtes quantiques et qubits de spin
Amélioration des qubits physiques	Matériau (inductances cinétiques, faible pertes RF)	Nouvelles espèces atomiques, contrôle spatio-temporel des lasers	Ingénierie des matériaux et protocoles pour baisser les seuils de fidélité (génération, transmission, manipulation...)	Matériau (insensibilisation au bruit de charge et aux spins environnants)
Augmentation du nombre de qubits par cœur	<i>Cross-talk</i> micro-onde	<i>Cross-talk</i> par les lasers, qualité du vide	États clusters; post-sélection permettant le passage à l'échelle	<i>Cross-talk</i> de charge
Interconnexion entre cœurs	Composants micro-ondes sans perte, guides d'ondes couplés aux puces, post-sélection par détection de photon unique	Couplage entre ions/atomes et fibres optiques à grande efficacité et bande passante	Couplage entre guide d'onde et fibre optique pour calcul distribué entre processeurs de taille intermédiaire	<i>Cross-talk</i> entre lignes de couplage, possiblement non pertinent si passage à l'échelle sur un cœur
Technologies habilitantes	Amplification à la limite quantique, composants et électronique de contrôle à 10 mK, cryogénie	Sources lasers et micro-ondes (haute puissance et bas bruit), vide cryogénique	Matériaux non-linéaires à faible perte, photo détecteurs bas bruit, sources lasers intégrées, circuits photoniques reconfigurables, cryogénie	Électronique de contrôle à basse température

Tableau 1: Enjeux des principales plateformes à l'horizon 2030

TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

L'accélération de la transformation digitale avec le déploiement de l'intelligence artificielle, de l'internet des objets, du *cloud computing*, se traduit par des besoins accrus en transmission et traitement des données. En plus d'enjeux de souveraineté et de sobriété énergétique, cette croissance du numérique fait face à des défis technologiques majeurs, appréhendés pour partie dans plusieurs programmes et équipements prioritaires de recherche de la stratégie nationale: PEPR Électronique, SPIN, 5G. La recherche fondamentale en physique peut ici y contribuer suivant plusieurs lignes de recherche déclinées par la suite.

CAPTEURS, IMAGERIE ET MÉTROLOGIE

Les capteurs et l'imagerie, et plus largement la perception numérique, sont devenus omniprésents dans un grand nombre de secteurs qui englobent la santé, l'environnement, l'agronomie, l'énergie, la défense, la sécurité civile, l'internet des objets, le contrôle non destructif, etc. Cette diversité des champs d'applications renvoie à une grande variété de dispositifs reposant sur des mesures optiques, électriques, magnétiques, acoustiques, etc. dont les performances ont évolué de manière spectaculaire au cours des dernières décennies. Aujourd'hui, face aux besoins croissants en détection et imagerie, en termes de performances, de gamme spectrale, et de conditions d'opération, une simple amélioration des composants existants et leur co-intégration suivant une architecture optimisée, ne suffiront pas. Plusieurs nouvelles voies, certaines en rupture, devront être explorées. Certaines sont ici évoquées.

Développer de nouvelles sources optiques cohérentes pour la spectroscopie dans le moyen-infrarouge

Plusieurs architectures sont aujourd'hui poursuivies: lasers à verrouillage de mode, conversion non linéaire de fréquence, générateurs de peignes de fréquences ou supercontinuum, dispositifs intégrés tels que les micro-résonateurs. Dans ce contexte, les circuits photoniques ou fibres optiques à base de verres de fluorures, tellurites ou chalcogénures semblent prometteurs, préfigurant la possible génération de supercontinuum et de peignes de fréquences dans des plages allant de 2 à 20 μm .

Déployer des dispositifs d'imagerie hyper-spectrale, multi-échelle et computationnelle, depuis l'infra-rouge jusqu'au THz

Un des enjeux est de pouvoir disposer d'architectures d'imagerie hyper-spectrale combinant éventuellement super-résolution et permettant d'accéder aux différents degrés de liberté des ondes (polarisation, phase, amplitude...) dans le domaine optique jusqu'au domaine THz. Les verrous se situent non seulement au niveau des composants individuels (notamment dans la gamme THz et sub-THz), mais aussi dans la conception jusqu'ici souvent disjointe des différents éléments de la chaîne de détection (signaux, sources, modulateurs, détec-

teurs, antennes THz et sub-THz, mise en forme spatiale et temporelle des faisceaux, schémas de modulation et formes d'ondes...). Afin de dépasser les limites d'une telle approche, une stratégie consiste à développer des approches de co-conception prenant conjointement en compte la nature du signal à mesurer, l'instrumentation employée et le traitement du signal utilisé en temps réel dans leur globalité, éventuellement couplées à des techniques d'apprentissage machine.

Développer des systèmes de détection, d'imagerie et de traitement du signal analogique intégrés

Afin de faire sortir du laboratoire les nouvelles architectures d'imagerie, l'intégration des composants est un prérequis. Il s'agit là d'intégrer non seulement les différents éléments de la chaîne de détection, mais aussi, à terme, des fonctions variées de traitement du signal, permettant d'exécuter sur puce certaines tâches à moindre coût énergétique, voire d'ouvrir la voie à la réalisation de tâches complexes de vision machine comme la reconnaissance de formes. Ces architectures pourraient tirer parti des interactions photons/phonons/magnons susceptibles d'apporter des capacités de traitement analogiques rapides, compactes et peu consommatrices, en s'appuyant sur des processus de conversions optique/acoustique/ondes de spin par exemple. Ces circuits, adaptés à une co-intégration avec des processeurs électroniques, pourraient d'autre part bénéficier des solutions d'architectures d'intelligence artificielle dans la couche physique.

Assurer une opérabilité en environnements sévères

Certaines applications, dans le domaine de l'énergie, de la défense, de la biologie et de la santé par exemple, imposent une opérabilité des capteurs dans des environnements sévères de température, de pression, parfois en milieu gazeux ou liquide. Ces conditions d'opération imposent des contraintes fortes, qui nécessiteront des développements matériaux et de nouveaux schémas d'interface et de transduction du signal. On peut ici citer par exemple les capteurs nano-(opto)mécaniques pour la détection en milieu biologique ou en atmosphère corrosive, ou encore l'imagerie optique adaptative en milieu turbide.

TÉLÉCOMMUNICATIONS

L'omniprésence et la transversalité croissantes du numérique se traduisent aujourd'hui par un doublement des flux de données tous les deux ans, préfigurant à terme des défis en matière de capacité, de débit, de fiabilité et de latence. Les enjeux industriels associés sont doubles: démultiplier nos capacités d'échanges de données (avec l'arrivée de nouveaux standards au-delà de la 5G par exemple), mais aussi permettre une évolution durable du secteur des communications numériques par une meilleure efficacité énergétique, une plus grande résilience et une meilleure prise en compte de l'impact environnemental. Les défis scientifiques sont déjà entrepris au sein de plusieurs programmes d'envergure de la stratégie nationale, tels que le PEPR 5G ou le PEPR Électronique.

Ils englobent l'électronique pour la conversion de fréquence, les interconnexions, l'intégration (circuits, mais aussi systèmes) et le *packaging*. Plusieurs ruptures seront aussi nécessaires dans le secteur des composants pour les télécommunications.

Vers une montée en fréquence

Un premier défi majeur est celui de la montée en fréquence des composants, à des fins d'augmentation de la fréquence porteuse et des débits dans les réseaux en espace libre. Si les liaisons sans fil sont actuellement dominées par les radiofréquences, les étendre dans le domaine du THz pourrait devenir un élément clé pour les réseaux terrestres à courte distance, mais aussi pour les communications entre satellites de mégaconstellations. Des progrès sont cependant encore nécessaires dans l'ingénierie des composants individuels (antennes, modulateurs, amplificateurs, récepteurs, sources...), non seulement en photonique micro-onde jusqu'à des fréquences de 100 GHz, mais aussi dans la gamme THz. Un autre enjeu est celui de l'intégration des composants individuels sur des plateformes optiques à faibles pertes et des plateformes électroniques de traitement du signal. Enfin, la montée en fréquences impose le développement de nouveaux systèmes mutualisés dédiés à la métrologie.

Vers des antennes actives et reconfigurables

La montée en fréquence des signaux s'accompagne, à surface de rayonnement équivalente, d'une plus grande focalisation. La reconfigurabilité des antennes devient alors nécessaire afin d'assurer la mise en forme et l'orientation du faisceau. Les surfaces intelligentes reconfigurables (ou RIS pour *reconfigurable intelligent surface*) que l'on retrouve également sous la sémantique réseaux transmetteurs (*transmitarrays*), sont de fait aujourd'hui considérées comme un composant clé pour les futures technologies sans fils, en permettant un contrôle dynamique des signaux radio entre un émetteur et un récepteur (pointage, focalisation, balayage, compensation atmosphérique...). Plusieurs architectures sont poursuivies : métasurfaces et métamatériaux activables, accordables et contrôlables, antennes à réseaux phasés, réseaux d'antennes sur puce à commandes actives (par exemple à base de commandes optiques intégrant circuits photoniques et NEMs, ou encore à base de composants électroniques intégrés). De même, l'idée émerge d'intégrer des antennes relais au sein de divers ouvrages (vitres, fenêtres, pare-brise...) en utilisant des matériaux conducteurs transparents. La montée en fréquence impose alors d'utiliser des matériaux nouveaux.

Vers une intégration photonique accrue et avancée

L'utilisation de l'électronique, pour traiter ou transmettre davantage de données, se confrontera à terme aux exigences d'une plus grande frugalité énergétique. La photonique trouve ici toute sa place, grâce au possible multiplexage spatial et en longueur d'onde; la photonique intégrée (sur semi-conducteurs III-V, silicium, nitrure de silicium ou par hybridation), offre en sus des possibilités de traitement de signal déporté sur puce

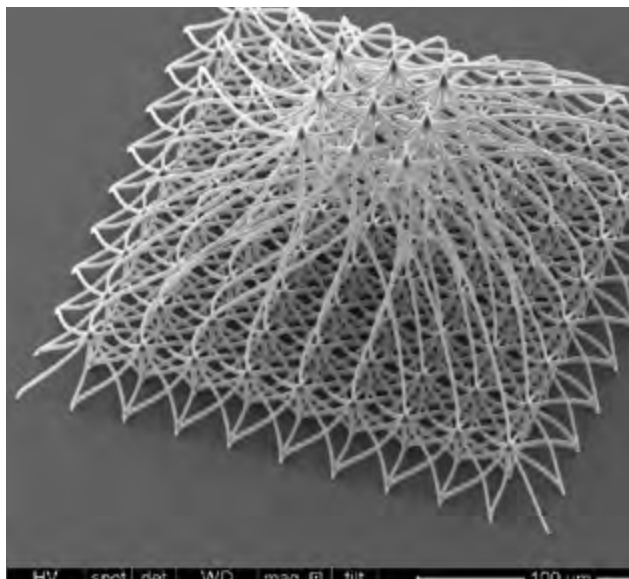
grâce à sa compacité, à la diversité des fonctionnalités intégrables et à sa plus faible consommation énergétique. Les circuits photoniques intégrés sont déjà utilisés dans les émetteurs-récepteurs optiques. À terme, les systèmes optiques intégrés pourraient permettre de réduire la quantité d'énergie nécessaire à la transmission des signaux et diminuer le temps de latence. Grâce à la complexité croissante et la reconfigurabilité des circuits intégrant amplificateurs, modulateurs, guides, convertisseurs, détecteurs et sources, une partie des opérations de traitement du signal, réalisée numériquement sur circuits électroniques, pourrait aussi être reléguée dans le domaine optique sur des circuits photoniques intégrés embarqués avant conversion analogique-numérique.

Vers des approches croisées entre optique et électronique

Un premier domaine à l'interface entre optique et électronique est celui de l'intégration hétérogène de circuits photoniques et électroniques, afin de réduire la longueur de l'interface optique-électronique et de fait les pertes et la latence, d'implémenter des interconnexions optiques sur puce électronique, et de diminuer la consommation d'énergie. Un autre domaine de convergence est celui de la photonique micro-onde et de la photonique THz, discutées plus haut, dont les enjeux se portent aujourd'hui vers l'amélioration des composants individuels (en particulier les sources) et leur co-intégration sur puce. Des enjeux stratégiques se posent ici en termes du maintien du savoir-faire en France, par exemple dans le domaine des diodes Gunn ou Schottky pour les composants THz. Un troisième domaine exploite la combinaison entre photonique et spintronique, avec notamment le développement des spin-LEDs ou spin-VCSELs. De façon plus prospective, la réalisation de neurones ou synapses suivant des architectures optiques ou spintroniques pose de premières briques vers des processeurs neuromorphiques qui pourraient bénéficier à terme d'une hybridation entre photonique et spintronique.

ÉLECTRONIQUE POUR LE CALCUL

Depuis plusieurs dizaines d'années, l'électronique pour le calcul a évolué autour d'une technologie ultra-dominante (la filière silicium et plus particulièrement le transistor CMOS associés à la fameuse loi de Moore) et d'un principe d'architecture de calcul lui aussi dominant, dit de von Neumann, dans lequel la mémoire où sont stockées les données est physiquement séparée du processeur où sont réalisés les calculs. Pour plusieurs raisons, nous vivons et allons vivre dans les dix prochaines années une transition importante autour de ces deux piliers cardinaux. D'une part, la miniaturisation des transistors CMOS est en train d'atteindre ses limites physiques avec des longueurs de grille de l'ordre du nanomètre. D'autre part, dans les calculateurs actuels, la part de consommation électrique ne servant qu'à transporter les données entre mémoire et calculateur peut représenter plus de 99,9%, ce qui conduit à repenser en profondeur les architectures. La croissance exponentielle du nombre de



Réseau de neurones artificiels. © Daniel BRUNNER

calculateurs, qui va encore s'accroître avec la montée en puissance de l'intelligence artificielle et de l'internet des objets, se traduit par un enjeu énergétique majeur, la part de l'électricité produite consommée par les calculateurs pouvant dépasser 20% à l'horizon 2030. Enfin, un dernier élément de contexte, en France et en Europe, est l'affaiblissement très important, ces trente dernières années, de l'industrie manufacturière de composants, la plupart des fonderies étant situées aujourd'hui en Asie et en Amérique du Nord. Cette situation est bien perçue par les pouvoirs publics et est au cœur des conditions énoncées pour réussir France 2030 que sont souveraineté et réindustrialisation. Les enjeux prospectifs pour la physique dans ces domaines peuvent être déclinés sous deux angles.

Accompagner les transformations de l'électronique dans les domaines des architectures de calcul et des composants associés

Compte tenu de la typologie et du coût des moyens de production de composants, ces transitions dans l'industrie ne se passeront pas de manière brutale, mais progressive, en conservant un rôle central au CMOS et au silicium. Le domaine le plus avancé est certainement celui des mémoires non volatiles avec de premières générations de composants (MRAM ou ferroélectrique) qui sont sur le marché ou très proches de l'être. Un premier enjeu consiste à accompagner le développement des générations futures à plus faible consommation comme les SOT-RAM, basées sur le couplage spin-orbite, et plus généralement travailler à développer des fonctions de lecture rapide ou d'écriture à très basse consommation. Un domaine plus émergent et donc plus ouvert est celui du développement de briques très basse consommation pour la logique, en associant, par exemple, les phénomènes de spin-orbitronique et magnétoélectrique (concept MESO proposé par Intel ou autre proposition originale). Plusieurs voies doivent être explorées pour proposer de nouvelles formes de logique (asynchrone, adiabatique, stochastique...). Les enjeux architecturaux seront centrés dans un premier temps sur des problèmes d'intégration hétérogène et le développement d'architectures hybrides et modulaires mêlant nouvelles tech-

nologies et composants CMOS. La montée en puissance de la photonique sur silicium pourrait s'avérer une option pertinente pour réaliser des connexions entre modules, voire même pour le calcul.

Un autre axe de travail consiste à s'assurer dès la conception de l'adaptabilité dans le temps des circuits afin d'augmenter leur durée de vie, en introduisant par exemple des fonctions d'auto-réparabilité ou des techniques de redondance ou de correction. À cette approche d'éco-conception s'ajoute la volonté d'optimiser les ressources matérielles et l'usage des matières premières rares.

Un niveau plus disruptif d'évolution architecturale consiste à envisager le calcul neuromorphique, inspiré du cerveau, en particulier pour l'intelligence artificielle. Plusieurs réalisations convaincantes de neurones ou synapses physiques ont été démontrées récemment, notamment à partir de technologies spintroniques ou photoniques. D'ici à 2030, un enjeu majeur sera de développer de premières réalisations fonctionnelles comprenant plusieurs dizaines à centaines de neurones, ce qui permettra de vérifier expérimentalement les gains importants attendus en termes de consommation. Un autre enjeu sera d'imaginer la meilleure manière de traduire la très forte densité d'interconnexions du cerveau dans un composant. Les voies traditionnelles s'avéreront certainement limitées et des propositions originales, comme celles basées sur la propagation des signaux en espace libre pourraient constituer des ruptures majeures.

D'une manière générale, il y a un fort intérêt à laisser s'interpénétrer les compétences et les efforts en physique et en conception de circuits, cœur de l'enjeu d'interdisciplinarité de ce domaine.

Promouvoir l'émergence de voies technologiques disruptives

Parmi elles, la spintronique est certainement le domaine qui a le plus pénétré les composants (mémoires) et architectures de calcul (neuromorphique) comme mentionné ci-dessus. La communauté française de recherche dans ce domaine est très structurée et a établi sa feuille de route qui est déclinée via le programme PEPR SPIN et pour partie au sein du programme PEPR Électronique, soutenus par France 2030. Plusieurs directions de recherche prioritaires dans ces programmes vont conduire au développement de dispositifs logiques, neuromorphiques et contribuer à l'étude d'architectures de calcul à très faible consommation. On retiendra entre autres l'exploitation de textures de spin topologiques, le développement de fonctions ultra-rapides jusqu'à la gamme du THz, ou encore la physique des ondes de spin pour la réalisation de circuits magnoniques. Enfin, les technologies spintroniques sont susceptibles d'établir des liens fonctionnels entre calculs classique et quantique.

L'électronique supraconductrice a déjà démontré la capacité de réaliser des fonctions très performantes

pour le calcul (logique ultra rapide de type *rapid single flux quantum* ou adiabatique de type *adiabatic quantum-flux-parametron*). Les applications attendues sont très spécifiques et ne visent pas les marchés de masse. Un enjeu technique central pour cette communauté, et au-delà celle des qubits supraconducteurs, serait de disposer d'une fonderie capable de réaliser des circuits reproductibles, qu'ils soient analogiques, numériques ou quantiques. La spécificité des matériaux supraconducteurs permettrait aussi d'envisager de développer une électronique basée sur la phase des signaux, ce qui serait susceptible d'ouvrir la voie vers plusieurs fonctionnalités innovantes. Il est sans doute nécessaire de travailler sur l'ingénierie des barrières tunnel afin d'accroître la maîtrise des performances des dispositifs Josephson. Enfin, il est regrettable qu'il n'y ait quasiment plus d'effort matériau visant à identifier des phases supraconductrices à des températures intermédiaires (40-50 K), ce qui permettrait de rester à des niveaux de bruit thermique faible tout en bénéficiant de solutions cryogéniques compactes et autonomes.

Une autre voie en émergence est l'électronique organique, possiblement flexible et extensible, de fabrication à bas coût. Plusieurs défis majeurs se posent cependant tels que le développement de matériaux sur mesure comme des élastomères électro-actifs ou bien des matériaux conducteurs pour la fabrication d'électrodes extensibles, ou encore de composants électroniques élémentaires (transistors à forte mobilité) ou de fonctions électroniques plus élaborées (mémoires, bascules, etc.) à base de matériaux biosourcés. L'électronique moléculaire représente quant à elle l'échelle ultime de la miniaturisation des composants. Cependant, l'accès à la molécule, les temps d'écriture ou encore les nombres de cycles possibles limitent les performances, qui in fine restent inférieures à celles du Si, qui bénéficie désormais de dimensions presque comparables aux molécules. Si l'avenir de l'électronique moléculaire est très incertain pour le calcul classique, les perspectives pourraient être plus ouvertes pour le calcul quantique. Le transport d'électrons polarisés en spin le long de la molécule, le greffage sur des nanoparticules métalliques ou encore le couplage avec des matériaux 2D présentent une physique riche, à défaut d'applications évidentes.

Au-delà de ces quelques voies, on voit émerger l'étude de systèmes hybrides associant, par exemple, supraconductivité et magnétisme ou matériaux 2D, spintronique et moléculaire ou organique, etc. Ce sont autant de voies dont l'exploration pourrait conduire à des fonctionnalités complexes et innovantes.

AXES TRANSVERSES

En plus de défis propres discutés précédemment, les technologies quantiques et les technologies numériques partagent plusieurs défis majeurs communs relevant de la recherche en physique, en particulier en sciences des matériaux et technologie. Elles tireront aussi profit d'évo-

lutions et de ruptures méthodologiques, en lien avec l'intelligence artificielle par exemple.

RECHERCHE EN MATÉRIAUX

Les matériaux sont la clé de voûte d'une majeure partie des composants précédemment discutés. Ils constituent l'élément limitant ou déclenchant pour un grand nombre d'applications. Relever les défis et les enjeux en physique pour les technologies quantiques et numériques exige un effort conséquent de recherche fondamentale en sciences des matériaux et procédés d'élaboration. Cet effort doit être entrepris suivant deux angles.

Accroître la maîtrise dans l'élaboration des matériaux conventionnels et dans leur hybridation

Malgré leur maturité, plusieurs défis restent à relever dans le domaine des matériaux conventionnels : Si, SiC, diamant, semi-conducteurs III-V, niobate de lithium, matériaux organiques, oxydes fonctionnels, matériaux magnétiques, matériaux supraconducteurs. Les objectifs de performance des composants optiques, électroniques et mécaniques, classiques ou quantiques, imposent un niveau de contrôle sans précédent sur la qualité des matériaux employés : contrôle du désordre et des impuretés, contrôle du dopage, contrôle des surfaces et interfaces, contrôle des contacts, et ce dans un contexte de réduction d'échelle spatiale des dispositifs. On peut ici mentionner en exemple le contrôle des défauts dits TLS (pour *two-level systems*) qui nuisent à la cohérence quantique des circuits supraconducteurs ou des résonateurs mécaniques. Outre une maîtrise accrue dans l'élaboration et la pureté des matériaux, un autre enjeu essentiel est l'intégration hybride, sous différentes formes (*on wafer*, monolithique, report localisé) de différents matériaux. Les raisons en sont d'une part la miniaturisation pour l'amélioration des performances (y compris énergétique), d'autre part l'extension des fonctionnalités offertes. Un exemple est l'intégration hybride de matériaux semi-conducteurs III-V avec des chalcogénures pour l'optique intégrée reconfigurable, ou avec des matériaux ferromagnétiques pour l'optospintronique, ou encore des matériaux piézoélectriques avec des supraconducteurs pour l'électromécanique quantique.

Promouvoir l'émergence de matériaux aux fonctionnalités nouvelles et innovantes

Plusieurs classes de matériaux émergents suscitent aujourd'hui un intérêt croissant et l'on pressent déjà pour certains un besoin significatif pour la conception et réalisation des composants à l'horizon 2030. Nous en donnerons ici trois exemples. Les matériaux multifonctionnels tels que les multiferroïques, ou bien les organiques, couplant propriétés mécaniques, acoustiques, électromagnétiques, optiques, thermiques, électriques ou magnétiques, constituent une voie prometteuse pour atteindre les objectifs de performances multiples de divers composants, notamment en électronique, pour les mémoires non volatiles de très haute densité ou bien pour les capteurs intelligents. Les matériaux à change-

ments de phase (citons NbO_2 qui s'inscrit dans la lignée de VO_2 déjà bien établi, ou encore les chalcogénures à base de Ge, Te, Se, S, Sb...) seront des éléments-clés pour la reconfigurabilité des composants optiques intégrés ou des antennes, particulièrement importante dans le cadre de la montée en fréquence des communications hertziennes. Les matériaux bidimensionnels ainsi que les hétérostructures de van der Waals (incluant toute la richesse des moirés) connaissent aujourd'hui un développement foisonnant. Les défis restent cependant encore multiples afin de confirmer l'intérêt de ces matériaux pour les applications. Ils englobent le passage aux grandes surfaces (incluant l'épitaxie des matériaux 2D et hétérostructures), le contrôle de l'empilement des couches et de leur angle, la compréhension fine de leurs propriétés aux surfaces et aux interfaces.

Cette recherche fondamentale en sciences et élaboration de matériaux se devra d'intégrer des contraintes responsables, notamment en termes d'impact environnemental (efficacité écologique, durabilité), mais aussi en termes de souveraineté et de capacité d'approvisionnement des matériaux. Dans cette direction, on peut citer les recherches vers de nouveaux substrats pour la croissance de couches pourtant déjà maîtrisées en homo épitaxie (cas des antimoniures par exemple).

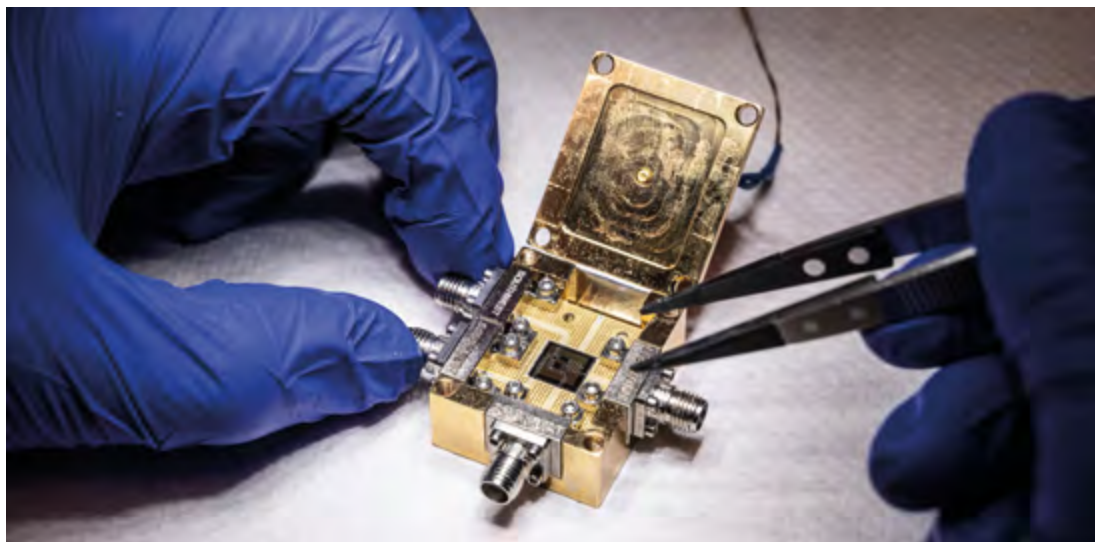
RECHERCHE EN TECHNOLOGIE

La recherche en technologie et nanofabrication est primordiale pour le développement de la plupart des technologies quantiques et numériques. Au-delà du contrôle et de la reproductibilité des procédés développés et employés, les évolutions dans ce domaine sont aujourd'hui dominées par l'intégration hétérogène de différents matériaux, mais aussi l'intégration hybride, éventuellement 3D, de plateformes jusqu'ici encore assez disjointes (optiques, électroniques, acoustiques...). Cette intégration hybride est essentielle afin de pouvoir tirer profit de l'actuelle convergence entre électronique, photonique, phononique, etc., et l'exploitation des processus de conver-

sion ondes/ondes en sus des conversions ondes/courant. Les enjeux se situent à la fois au niveau de la basse dimensionnalité (avec la miniaturisation des composants) et de la grande échelle (avec l'intégration de plusieurs fonctions sur une même puce). Dans ce contexte, de nouveaux paradigmes de connexion seront à trouver, à la fois *chip-to-chip* et *on-chip*, sur des plateformes intégrables dans les standards de fabrication industrielle et compatibles avec les marchés de masse pour les technologies numériques en particulier. En vue d'amener ces différents composants vers des produits, les aspects d'emballage et d'interfaçage seront essentiels. Les solutions d'impression 3D pour le packaging ou le dépôt de métaux sont des alternatives prometteuses.

CONVERGENCE PHYSIQUE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les récents progrès fulgurants en intelligence artificielle, comme l'apprentissage profond, symbolique ou neuro-inspiré, présagent de potentialités nouvelles, voire de ruptures technologiques à plusieurs niveaux dans le champ de la physique. Un premier niveau est celui de la modélisation et de la simulation aux performances accrues. L'introduction d'algorithmes d'intelligence artificielle dans les techniques conventionnelles de calcul numérique pourrait rendre possible le traitement de problèmes complexes jusqu'ici difficiles voire inaccessibles, par exemple dans le champ des matériaux quantiques ou en chimie quantique. Un deuxième niveau porte sur la conception optimale et globale des architectures système (de réseaux de communication, d'imagerie, de calcul) et l'optimisation des protocoles de mesure, par design inverse par exemple. Les algorithmes d'intelligence artificielle s'annoncent aussi d'intérêt fort pour l'analyse et le traitement des données; on peut ici citer la reconstruction d'image ou encore la reconnaissance de forme. Enfin, l'intelligence artificielle dans la couche physique pourrait ouvrir la voie à de nouvelles approches de calcul en rupture et plus sobres, avec l'émergence de circuits neuromorphiques sur puce optique, électronique ou hybride.



Installation d'une puce supraconductrice dans son porte échantillon (circuit imprimé) © Hubert RAGUET / Alice&Bob / LPENS / CNRS Images

Culture scientifique

RÉSUMÉ

CNRS Physique aura comme défi dans les années à venir de **tisser encore plus de liens entre Physique et Société**. Il s'agit là d'une mission centrale d'un organisme national de recherche. Ces liens passent en particulier par une volonté commune de s'intéresser aussi bien à la culture comme bien commun, qu'à la culture comme connaissance individuelle des Françaises et des Français.

La place aujourd'hui de la science dans la culture des français, du grand public comme des femmes et des hommes politiques, n'est pas à la hauteur des défis que le monde doit affronter. On peut par exemple déplorer la faible présence des informations scientifiques dans les media généralistes. **Pourtant les Françaises et les Français conservent une bonne image de la science et combler ce déficit culturel répond à une demande des citoyennes et de citoyens**. Mais les enjeux vont bien au-delà : **le fonctionnement de notre société n'a jamais impliqué une dimension scientifique aussi importante**. En particulier, les choix politiques et les enjeux sociétaux nécessitent, pour les appréhender, choisir ou voter, une connaissance scientifique des phénomènes et de leurs implications.

Pour y parvenir, CNRS Physique pourra dans l'avenir s'appuyer sur trois leviers d'action : **l'éducation** à destination du monde scolaire, la **médiation** à destination de la société et des décideurs et décideuses et, dans une moindre mesure, la **recherche participative**.

POINT DE LEVIER : L'INTERACTION AVEC LE MONDE DE L'ÉDUCATION

Des enquêtes issues du milieu professionnel indiquent chaque année que le nombre d'ingénieurs formés en France n'est pas suffisant (il en faudrait de l'ordre 15 000 de plus, toutes disciplines confondues) et la physique est une discipline socle de la formation d'ingénieurs. Il s'agit donc d'un enjeu majeur que de convaincre la jeune génération de s'engager vers des carrières en physique. Et en particulier les jeunes filles qui ne représentent que 20% des élèves dans les grandes écoles généralistes, comme elles le sont parmi le personnel chercheur de CNRS Physique. En se rendant dans les lycées pour parler de la diversité des sujets de recherche en physique, de leur impact sur la vie de tous les jours et des grands enjeux sociétaux, mais aussi pour présenter leurs métiers et leur parcours, les physiciennes et les physiciens peuvent être des « rôles modèles » pour susciter des vocations.

En amont, les tests nationaux et internationaux en science montrent de nos jours des résultats faibles des élèves français. Plusieurs causes à ce retard ont été identifiées. On peut noter en particulier un volume horaire effectif pour l'enseignement scientifique en primaire très en deçà du nombre d'heures prévues dans les programmes, avec des modalités d'enseignement souvent très éloignées des préconisations. L'intervention de chercheurs et chercheuses dans les classes en appui des enseignantes et enseignants ou dans le milieu périscolaire peut permettre de transmettre les bases de la démarche scientifique, qui constitue le fondement de la construction des savoirs.

Une interaction constructive entre physiciennes, physiciens et enseignantes et enseignants du second degré peut permettre à ces derniers d'actualiser leurs cours en convoquant des exemples actuels porteurs de sens. De nombreuses formations dans le cadre des **Écoles académiques de formation continue** ou par exemple en



Vie et mort d'une bulle de savon. *Curiositas*. © Angélique GILSON

partenariat avec les Maisons pour la science, l'ouverture des portes de laboratoires aux enseignantes et aux enseignants (et à leurs élèves) constituent un bon levier de soutien au système éducatif.

Enfin, la didactique de la physique est une discipline dans laquelle le nombre de chercheurs et de chercheuses, en France, est extrêmement réduit. La participation ponctuelle des physiciennes et physiciens aux réflexions de didacticiens pourra être fructueuse.

POINT DE LEVIER : LA MÉDIATION SCIENTIFIQUE ET LA VULGARISATION

Les enjeux sociétaux de la science sont largement reconnus, et depuis quelques années, **plusieurs mécanismes se sont mis en place** pour inciter les chercheurs et les chercheuses à partager les connaissances scientifiques. On peut citer pêle-mêle le 1% ANR, les médailles de la

médiation scientifique du CNRS, les chaires de médiation scientifique à l'IUF ou encore les fortes incitations au sein des PEPR à conduire des actions de médiation. **La diffusion de la culture scientifique auprès d'un public large, non nécessairement scolaire, devra bénéficier d'un soutien attentif de CNRS Physique dans les années à venir.**

Une attention sera donnée à s'intéresser à des **catégories de public identifiées comme critiques**. Une première catégorie concerne les médiateurs, journalistes — qui relaient l'information en provenance des institutions et des revues scientifiques vers le grand public. La qualité des informations qu'elles ou ils transmettent est absolument cruciale. Il s'agit également de les intéresser à la diversité des résultats de la recherche qui va bien au-delà des sujets habituellement médiatisés. Une seconde catégorie importante concerne les décideurs et décideuses du monde socio-économique, les femmes et les hommes politiques. Amenés à prendre des décisions importantes

qui relèvent en partie de connaissances scientifiques, ils doivent être une de nos cibles principales.

Une caractéristique majeure de la médiation portée par le CNRS, et en particulier par CNRS Physique est le **fort lien entre les résultats de la recherche des laboratoires et les actions soutenues**. Ceci restera vrai dans les années à venir. Les outils mis en place comme «les actualités scientifiques» des laboratoires, les communiqués de presse, la collaboration entre l'Institut et la revue «Reflets de la physique» seront amenés à prendre de l'ampleur. Il faudra également veiller à ce que cette communication puisse être appréhendée par l'ensemble du public, alors qu'il s'agit très souvent de résultats complexes. Cet effort pourra être accompagné par la formation des personnels à la communication scientifique.

Enfin, même s'il ne s'agit pas à proprement parler de vulgarisation ou de médiation, le CNRS s'est engagé dans une dynamique forte de science ouverte. Il s'agit de rendre disponibles les publications scientifiques primaires ainsi que les données produites par la recherche. La recherche publique française est très engagée dans ce processus avec la mise en place du PNSO (plan national pour la science ouverte) par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche en 2018. Le CNRS a publié dès l'année suivante sa feuille de route pour la science ouverte, puis a mis en place en 2020 le plan données de la recherche. Au niveau international, la communauté des physiciennes et des physiciens a été pionnière dans ce domaine, grâce à la base arXiv lancée dès 1991.

POINT DE LEVIER : LA RECHERCHE PARTICIPATIVE

Historiquement, la science dans laquelle les amateurs ont toujours joué et continuent de jouer un rôle essentiel est l'astronomie. Les physiciennes et les physiciens de CNRS Physique sont globalement absents du domaine de la recherche participative malgré quelques timides tentatives, comme le *Big Bell Test*, mais elles font figure d'exceptions. De plus, cette expérience constitue plutôt une façon originale de faire de la médiation que de faire progresser les connaissances. Pourtant, **la physique est bien là, notamment à travers la mesure**, présente dans la grande majorité des projets de science participative, mais rarement à l'initiative des physiciennes et physiciens.

Un autre aspect de la recherche participative pour laquelle les implications sociétales fortes de la physique pourront être mobilisées dans l'avenir concerne les projets de recherche construits à partir des préoccupations des citoyennes et des citoyens, y compris les plus éloignés de la Science. En effet, si CNRS Physique a montré dans le passé une forte capacité de ses membres à construire des sujets de recherche fondamentale à partir de questions industrielles (unités mixtes CNRS-entreprises, laboratoires communs), le champ des sujets de recherche fondamentale construits à partir du dialogue

avec la société civile reste à construire. L'enjeu sera alors double : apporter des réponses réelles à des problématiques souvent complexes, et gérer la frustration d'un public face à la lenteur souvent inhérente à la recherche scientifique.

CONCLUSIONS

La diffusion de la culture scientifique est un enjeu majeur pour les organismes de recherche. Cette démarche peut s'articuler autour de trois niveaux principaux. Premièrement, la diffusion de la science ouverte, qui implique de partager les données et les processus scientifiques bruts pour une transparence accrue. Deuxièmement, la mise en lumière de la recherche en physique passe par la communication des résultats de recherche, rendus accessibles et compréhensibles à destination d'un public élargi. Enfin, la diffusion de la science de base consiste à partager les principes fondamentaux de la science au grand public.

Pour CNRS Physique, ces deux premiers niveaux de diffusion revêtent une importance particulière à l'horizon 2030. Non seulement ils permettent de mettre en lumière les avancées et les applications concrètes de la recherche en physique, mais ils contribuent également à renforcer sa visibilité et sa crédibilité. Ainsi, en se focalisant sur la diffusion de la science ouverte et des résultats de recherche de manière pédagogique et inclusive, les physiciennes et les physiciens de CNRS Physique pourront établir un lien fort avec le public, tout en préparant le terrain pour les futures initiatives de communication scientifique.



Personnel en salle blanche.
© Linda JEUFFRAULT / GREMI / CNRS Images

Parité et diversité(s)

RÉSUMÉ

La parité et la diversité dans les laboratoires de physique ont fait l'objet d'un atelier transverse spécifique. En effet, ces questions concernent peu ou prou tous les domaines scientifiques de CNRS Physique, et demandent clairement une politique globale qui ne se limite pas à une communauté particulière. L'atelier s'est en particulier appuyé sur une enquête sur ce sujet proposée aux personnels de l'Institut et qui a obtenu plusieurs centaines de réponses, dont environ la moitié venant de femmes. L'analyse effectuée concerne essentiellement la parité et le handicap, d'autres types de diversité existant bien sûr (minorités raciales par exemple) et devant également être l'objet d'attention, mais étant plus difficiles à mesurer ou promouvoir dans le cadre actuel.

LA PLACE DES FEMMES À CNRS PHYSIQUE

La proportion de femmes dans la recherche en physique reste globalement très faible et ceci malgré une volonté affichée de la direction du CNRS (création de la MPDF-Mission pour la place des femmes, mise en place du Comité parité-égalité du CNRS et du plan d'action pour l'égalité 2021-2023...). Cela amène à s'interroger sur les raisons systémiques à l'œuvre et à envisager le déploiement de mesures efficaces pour se rapprocher de la parité d'ici 2030. C'est une question d'égalité et de justice, mais aussi d'intérêt bien compris pour le CNRS et pour la société en général : étant donnée l'importance des défis à relever pour l'avenir de la planète, *The world cannot afford the loss of the talents of half its people if we are to solve the many problems which beset us* (Rosalyn Yalow, prix Nobel de physiologie ou médecine). Dans les instituts du CNRS liés à la physique (CNRS Physique, CNRS Ingénierie, CNRS Terre & Univers, CNRS Nucléaire & Particules), la proportion de femmes en recherche a peu progressé depuis une dizaine d'années. L'évolution moyenne du pourcentage de femmes recrutées comme chercheuses dans ces instituts est positive de 2007 à 2012 et semble atteindre un plateau ensuite aux alentours de 25 %, CNRS Physique étant plutôt dans la moyenne basse de ces quatre instituts. La situation est similaire dans les métiers de soutien des branches d'activité professionnelle (BAP C (sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique) et E (informatique, statistiques et calcul scientifique), mais est inversée dans les métiers administratifs (BAP J, gestion et pilotage). Rappelons que le rapport social unique du CNRS rend accessible des données statistiques annuelles très précises concernant les proportions de femmes et d'hommes dans les différents métiers.

Une partie du problème vient d'un vivier de candidates beaucoup moins important que le vivier de candidats. La faible attractivité apparente pour les femmes de certains métiers ou de certaines disciplines scientifiques provient certainement en grande partie des stéréotypes, et notamment des biais de genre, qui commencent dès l'éducation des jeunes enfants influencés également par la représentation des scientifiques dans la société. L'influence de ces stéréotypes continue sans doute à se faire sentir à partir du recrutement et tout au cours de la carrière. De plus, l'enquête lancée à l'occasion de la prospective a montré que les femmes déclarent très nettement plus souvent rencontrer des difficultés dans les laboratoires de physique que les hommes, obstacles qui ralentissent ou compliquent leurs carrières, et influent sur leur bien-être au travail. Aux difficultés vécues par les femmes s'ajoutent souvent les contraintes familiales dans une société où les tâches ménagères sont trop rarement équitablement réparties, et où les femmes sont plus souvent que les hommes amenées à être parents célibataires. Et bien sûr il est nécessaire de prendre en compte l'arrêt de l'activité professionnelle pendant le congé de maternité. De surcroît, les femmes dans des

milieux très masculins sont amenées à adopter des codes sociaux qui ne leur sont pas familiers, et peuvent en souffrir sans parfois avoir conscience de cette difficulté, pensant que ce sont elles qui sont à l'origine du problème. Ainsi, l'enquête a montré que plus des quatre cinquièmes des femmes ayant répondu déclarent avoir déjà eu l'impression de ne pas être à leur place, contre une moitié de leurs collègues masculins. Tous ces paramètres font que le déséquilibre femme-homme s'accroît à mesure que l'on monte dans la hiérarchie, jusqu'aux postes de responsables d'équipe, de direction d'Unité et de direction d'Institut qui sont très rarement occupés par des femmes. Et ce, alors que les femmes s'impliquent beaucoup dans des tâches collectives souvent très prenantes. Globalement, un peu plus de la moitié des femmes ayant répondu à l'enquête se déclarent satisfaites du déroulement de leur carrière, contre les trois quarts des hommes. Tout ceci montre que la situation des femmes à CNRS Physique nécessite un accompagnement et des mesures spécifiques.

LA PRISE EN COMPTE DU HANDICAP À CNRS PHYSIQUE

La réflexion à engager par l'Institut sur l'égalité doit aussi intégrer la question des personnes en situation de handicap. En effet, le taux de personnes bénéficiaires de l'obligation d'emploi n'est que de 5,67% au CNRS pour un objectif légal de 6%, malgré une politique spécifique de recrutement mise en place, avec un taux de personnes en situation de handicap dans la population générale que l'on sait bien supérieur. Beaucoup reste à faire pour améliorer l'accueil de ces personnes au sein de l'Institut tout au long de leur carrière, qu'il s'agisse de chercheurs, ingénieurs ou techniciens, hommes ou femmes. De nouveau, l'enquête réalisée à l'occasion de la prospective a montré qu'un peu plus de la moitié des personnes en situation de handicap se sentent à l'aise dans leur travail contre plus des quatre cinquièmes de leurs collègues sans handicap. Les principales difficultés identifiées sont liées à l'accessibilité (aux laboratoires comme aux lieux de réunion ou conférence), à l'adaptation des postes de travail et aux voyages professionnels. Pour rappel, 80% des handicaps sont des handicaps invisibles. L'adaptation du poste de travail peut être technique, mais aussi correspondre à des aménagements spécifiques du temps de travail et du contenu. Les déplacements professionnels constituent un énorme obstacle pour certains ou certaines, avec des répercussions sur l'évolution de leur carrière. Les personnes en situation de handicap ayant répondu à l'enquête affirment pour les quatre cinquièmes avoir le sentiment de rencontrer des difficultés à obtenir des financements ou des promotions à la hauteur de leur investissement professionnel, contre environ la moitié des autres personnels. Il y a souvent également une impression d'incompréhension par les collègues de l'impact du handicap. Tout cela montre que malgré une politique récente du CNRS (personnel dédié au service des ressources humaines et en délégations, mise en place d'un

plan d'action handicap 2020-2023), la position des personnes en situation de handicap à l'Institut n'est pas encore équivalente à celle de leurs collègues.

AMÉLIORER LA SITUATION D'ICI 2030

Il reste beaucoup à faire dans ces domaines. Concernant la parité, CNRS Physique a récemment créé une cellule parité-égalité, et a commencé à mettre en place un réseau de référentes et référents parité-égalité dans les laboratoires qui lui sont rattachés. Le Conseil scientifique d'Institut a lancé une réflexion sur la situation des femmes en physique, qui a mené à l'adoption récente de recommandations à l'unanimité en 2023. Il est clair que la question de la parité est en train de devenir une préoccupation majeure au sein de l'Institut, et nécessitera des actions dédiées dans les prochaines années, en lien avec la politique globale du CNRS sur le sujet. Des actions spécifiques sur l'accompagnement et le suivi des personnes en situation de handicap doivent être également développées. Toutes les actions mises en place requerront un suivi dans la durée, avec évaluation régulière et adaptation ou ajustements si besoin. Certaines mesures peuvent être prises au niveau des laboratoires, ou à celui de l'Institut ou même du CNRS. Des échanges avec d'autres Instituts du CNRS et envisageant de mettre en place des actions, ou avec d'autres institutions en France (universités) et à l'étranger (notamment en Europe), et bien sûr avec la MPDF, pourraient accélérer la progression en échangeant sur les actions pertinentes et en suscitant de nouvelles idées.

Toutes ces mesures devront tendre à faire de CNRS Physique un institut inclusif dont les agents reflètent la société dans son ensemble, et où tous les personnels auront accès aux mêmes possibilités de carrière et de bien-être au travail, qu'ils soient femme ou homme, et en situation ou non de handicap.



Camionnette de livraison de colis.
© Claudio SCHWERZ, Unsplash

Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en Physique

RÉSUMÉ

Ce document prospectif évalue **les conséquences de la crise environnementale sur la recherche en physique au cours des dix prochaines années, ainsi que les mesures nécessaires pour intégrer ces nouvelles contraintes tout en maintenant une recherche de haut niveau.** Il contient de nombreuses remarques qui s'appliquent à toutes les recherches, et tout particulièrement à la physique. Ainsi, la recherche en physique sera confrontée durant la prochaine décennie à l'obligation légale de réduire rapidement ses émissions de carbone (2 à 5 % par an) et devra faire face à des pénuries de ressources essentielles. **Sans une action déterminée de la communauté scientifique, cette crise environnementale pourrait avoir des conséquences néfastes sur la liberté de la recherche, la cohésion interne des laboratoires et le soutien public à la recherche en physique.** Répondre à ces enjeux entraînera des changements dans les pratiques de recherche aux échelles individuelle, du laboratoire, mais aussi institutionnelle.

Depuis plusieurs années, la communauté scientifique s'est engagée dans l'évaluation des impacts environnementaux de ses activités, notamment à travers l'initiative Labos 1point5. De nombreuses actions ont été entreprises pour réduire la consommation d'énergie, limiter les déplacements, réduire la production de déchets et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Cependant, des divergences d'opinions ont émergé quant à la nécessité ou à l'efficacité de ces mesures, entraînant parfois des tensions. Les laboratoires ne pouvant être seuls tenus responsables de la réduction de leur empreinte carbone, **il serait bienvenu que les tutelles fournissent un cadre commun et des outils permettant à toutes les structures de recherche d'évaluer leur empreinte environnementale, et de proposer des trajectoires de réduction spécifiques pour chaque structure.** La réalisation de ces objectifs nécessitera des financements adaptés pour mettre en œuvre les transformations

nécessaires. Le numérique et les grandes infrastructures de recherche, tous deux fortement concernés par la raréfaction des ressources, devraient faire l'objet de concertations spécifiques en vue de leur mise en service aussi bien que de leur utilisation optimale.

La politique des ressources humaines jouera un rôle clé pour une utilisation optimale des ressources et le maintien d'une recherche de haut niveau. Une **politique volontariste de recrutement de personnel technique permettra aux laboratoires de transformer leurs pratiques** en faveur de la réparation, la fabrication économe, la maintenance et l'utilisation optimale des équipements et des infrastructures. Il sera également nécessaire d'**accompagner au mieux les chercheurs·ses désireux d'adapter leurs pratiques ou leurs sujets de recherche aux enjeux environnementaux**, et à repenser les modalités d'évaluation pour valoriser les actions en faveur de pratiques durables.

Considérant que le modèle actuel de financement compétitif par appels d'offres, introduit dans un contexte de ressources abondantes, est mal adapté à la situation présente, il est également proposé d'accroître la **planification dans l'attribution des ressources et la coordination dans leur allocation**, et de viser à une meilleure **complémentarité entre les différents niveaux de financement** (régional, national, européen). L'importance d'un dialogue renforcé entre la communauté scientifique et la société est également soulignée, afin d'éclairer le public sur la réalité des impacts socio-environnementaux des recherches en physique et de leurs éventuelles retombées technologiques et pour **maintenir un soutien du public à l'effort public de recherche**.

Intégrer les enjeux environnementaux à la recherche en Physique

INTRODUCTION

Interroger l'avenir de la physique au CNRS, c'est chercher à entrevoir les domaines en émergence, mais aussi penser les conditions futures d'exercice de cette recherche. Jusqu'à récemment, elles pouvaient se résumer au budget dont disposait l'établissement et ses partenaires et au contexte institutionnel définissant statuts des personnels, place des agences de financement, grands programmes, politique européenne de la recherche, etc. À ces conditions s'ajoutent désormais les contraintes bien plus tangibles et incontournables des crises climatiques, énergétiques et écologiques. Ces crises, prédites de longue date par les scientifiques, se matérialisent et se répercutent dans toutes les sphères de la société et elle ne devrait que s'accroître dans la prochaine décennie. La physique étant gourmande en ressources naturelles, en objets technologiques et en énergie, elle en sera particulièrement affectée. Les contraintes qui toucheront notre activité sont de plusieurs natures :

— la recherche en physique devra prendre sa part de l'effort général de réduction des émissions carbone pour permettre au pays de respecter ses engagements internationaux. Si l'objectif pour notre discipline reste à préciser, les auditions laissent entrevoir un rythme minimum de réduction de 2% par an, plus probablement autour de 5%¹ ;

— L'énergie, qu'elle soit d'origine fossile, nucléaire ou renouvelable, va progressivement se raréfier.² Ainsi, même si l'électricité est faiblement carbonée en France, les efforts de sobriété et d'électrification des usages accroîtront les tensions d'approvisionnement auxquelles les laboratoires et plus encore les infrastructures de recherche n'échapperont pas ;

— D'autres ressources comme l'eau, l'hélium ou les terres rares, déjà sous tension, risquent également de ne plus être aisément disponibles ;

— Enfin, le changement climatique engendra des événements extrêmes (canicules, sécheresses, inondations, etc.) qui pourraient menacer certaines infrastructures de recherche.

Au-delà de ces conséquences directes, l'aggravation de la crise climatique et environnementale pourrait aussi fortement impacter la dynamique interne de la recherche.

D'une part, la recherche en physique devra faire face à une nouvelle demande sociétale qui exigera d'elle des solutions technologiques à cette crise. Elle a su, au fil des décennies, négocier un équilibre entre sa contribution à l'innovation et le maintien d'une recherche fondamentale de haut niveau. Mais la crise environnementale pourrait rapidement constituer une urgence quasi existentielle pour la population ou les décideurs. Dès lors, l'équilibre entre recherches appliquée et fondamentale pourrait être remis en cause et rendre plus incertain le soutien public à une recherche détachée de ces questions. Sans un nouveau compromis collectivement négocié, un nouveau « régime des promesses » pourrait se mettre en place, mettant en concurrence les sous-disciplines, chacune cherchant à justifier son existence par la perspective d'offrir un remède aux maux d'une société désespérée.

Un deuxième effet déstabilisant est déjà perceptible à bas bruit dans les laboratoires. Certaines personnes parmi les plus attentives aux enjeux environnementaux en viennent à s'interroger sur le sens de leur métier face à une menace pour la société perçue comme imminente. Si la discipline dans son ensemble refusait de prendre au sérieux ces interrogations et d'y répondre, une fracture pourrait apparaître au sein même des laboratoires, laissant de côté une partie des personnels. Ce mécanisme de démobilisation par perte de sens s'observe déjà chez certains étudiants, fortement sensibilisés à ces questions. Un tel processus de désaffection est peut-être la menace la plus sérieuse que fait peser la crise écologique sur la recherche en Physique.

Si, pour des raisons éthiques³ ou pragmatiques, la nécessité d'intégrer ces nouvelles contraintes dans nos pratiques a peu à peu gagné le monde de la recherche, c'est d'abord par des initiatives locales au sein des laboratoires, progressivement structurées avec notamment la création du collectif Labos 1point5⁴ dont le premier objectif était de promouvoir la réalisation de bilans de gaz à effet de serre (BGES). Au-delà d'un accompagnement bienveillant de ces initiatives, manifesté par exemple par la création du GDR Labos 1point5, les institutions de recherche seront amenées dans un avenir proche à contribuer à ces transformations de façon beaucoup plus significative et à la hauteur de ces nouveaux enjeux.

1 <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/plan-climat-biodiversite-et-transition-ecologique-de-l-enseignement-superieur-et-de-la-recherche-91292>

2 ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

3 comite-ethique.cnrs.fr/avis-du-comite-integrer-les-enjeux-environnementaux-a-la-conduite-de-la-recherche-une-responsabilite-ethique

4 labos1point5.org

Ce chapitre propose quelques pistes de réflexion, en se fondant sur un certain nombre de constats préalables :

— **Il faut tout d'abord lever l'illusion que la recherche en physique pourrait se soustraire à l'effort commun de sobriété et arguer d'une forme d'exception au nom de son rôle dans la lutte contre le réchauffement climatique et ses effets.** La physique ayant accompagné et rendu possibles certains progrès techniques, elle pourrait être tenue pour responsable d'une partie des problèmes actuels de nos sociétés. Recherches fondamentales comme appliquées sont certes pertinentes dans cette lutte : elles peuvent apporter, à moyen et surtout long terme, des connaissances et des techniques facilitant l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets.⁵ Mais celles-ci seront insuffisantes au regard de l'ampleur et de l'urgence de la crise que le monde traverse⁶ et la physique doit donc, comme les autres secteurs, faire preuve d'exemplarité dans l'utilisation raisonnée des ressources et la réduction de ses propres émissions ;

— **Les institutions universitaires et de recherche réticentes à adopter une trajectoire de sobriété pourraient s'engager dans des démarches assimilables à du *greenwashing*.** D'ores et déjà apparaissent des classements « verts » des universités, prélude à leur mise en concurrence sur la base de prétendues vertus environnementales. Les institutions de recherche doivent refuser de participer à un tel mécanisme et faire preuve de transparence et de sincérité quant au véritable coût environnemental de leur activité et au réalisme des promesses technologiques qu'elles portent. Une telle démarche est impérative si l'on veut maintenir sur le long terme un soutien de la population et une attractivité de la discipline ;

— **Le problème est en grande partie systémique : la recherche scientifique, notamment en physique, s'est construite dans un contexte d'abondance en ressources matérielles et en énergie. Ce modèle doit être largement repensé pour intégrer dans nos pratiques la sobriété et l'efficacité dans l'utilisation des ressources que cette crise impose.** Ainsi, l'échelle du laboratoire, à laquelle se concentrent aujourd'hui l'essentiel des efforts, n'est que partiellement pertinente pour traiter ces questions.⁷ Il semble important que les organismes de recherche prennent le relais en proposant des outils et un cadre d'action cohérent et en s'engageant dans une refonte des modes de fonctionnement de la recherche : financement, évaluation, organisation des collectifs de travail, etc. ;

— **Au-delà de ces réformes institutionnelles, un changement profond s'impose dans une culture de la recherche** qui assimile trop souvent l'innovation au progrès, valorise la dépense matérielle et la mobilité aux dépens de

la réutilisation et la proximité, et qui lie dépense énergétique et excellence scientifique.

Partant de ce constat, le rapport est organisé suivant quatre axes de réflexion, traitant successivement de l'évolution nécessaire des pratiques de recherches à l'échelle du laboratoire, des adaptations en termes de politique de recherche en termes de financement, de ressources humaines et d'évolution des carrières, mais aussi des enjeux spécifiques des grandes infrastructures et du numérique.

ÉVOLUTION DES PRATIQUES AU SEIN DES LABORATOIRES

L'analyse des BGES⁸ offre un regard transverse sur les pratiques de la recherche à travers les ressources matérielles mobilisées. Elle montre que l'empreinte environnementale de la recherche en physique, science à dominante expérimentale, se rapproche davantage de celle du secteur industriel que du tertiaire. La dimension internationale de l'activité engendre également une forte mobilité. De nombreuses initiatives ont été prises dans les laboratoires pour tenter de diminuer ces impacts environnementaux, laissant apparaître de possibles divergences et points de tension.

SUR LES BGES ET PLANS DE RÉDUCTION

Depuis 5 ans environ, les BGES des laboratoires ont été conduits par des collectifs de volontaires, souvent soutenus par leur direction. Ils ont établi une méthodologie et organisé la délibération avec la volonté d'aboutir à un large consensus. De leur côté, les tutelles ont soutenu ces initiatives locales et agi pour une sensibilisation large à ces enjeux. Elles ont fait établir leur propre BGES afin de se conformer à une exigence légale.

Ce processus a mis au jour des divergences entre collègues. Certains soutiennent la prise en compte des enjeux environnementaux dans la pratique de la recherche, d'autres y sont opposés ou en désaccord sur le degré de prise en compte. Ces dissensions entre individus, équipes ou laboratoires sont d'autant plus sévères qu'elles s'ajoutent à la forte compétition dans l'attribution des moyens. Elles montrent que le volontarisme de quelques-uns ne peut suffire à emporter l'adhésion de tous : **sans un cadre cohérent, discuté et instauré à tous les niveaux, ces démarches individuelles se heurteront à une forme de scepticisme quant à leur efficacité.** Il est ici essentiel de rappeler que l'objectif premier des BGES est la mise en place d'un plan de réduction et non pas de comparer entre elles différentes structures dont le périmètre et les spécificités peuvent être très variables.

5 cnrs.fr/comitenational/cs/recommandations/Dereglement_climatique_et_CNRS_valide-4_07_2023.pdf

6 Sur les solutions technologiques pour la production d'énergie à l'horizon 2050 : www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques

7 sur les petits gestes et les efforts collectifs, voir : <https://www.carbone4.com/publication-faire-sa-part>, et lemonde.fr/podcasts/article/2022/07/05/climat-peut-on-sauver-la-planete-avec-des-petits-gestes_6133404_5463015.html

8 J. Mariette et al, *Environ. Res.: Infrastruct. Sustain.* 2 035008 (2022) ; André Estevez-Torres, communication privée.



Chantier et personnel de chantier. © Scott BLAKE, Unspalsh

CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES, BÂTIMENT ET RÉSILIENCE

Les personnels des laboratoires de physique possèdent une forte expertise spécifique dans l'analyse et l'optimisation des consommations des infrastructures et laboratoires. Celles-ci ont déjà été mises à profit dans plusieurs initiatives ayant permis de réduire la consommation énergétique d'instruments, bâtiments ou infrastructures sans dégradation du service, mais au prix d'un investissement important en moyens humains, depuis la conception jusqu'à la gestion des systèmes optimisés, voire aux modélisations réalisées par des chercheur·ses.⁹ Dans une perspective de réduction des impacts, il est donc essentiel de les impliquer en amont, mais également de valoriser leur implication. Au vu des montants en jeu, cependant, l'indispensable rénovation de bâtiments anciens est principalement du ressort des tutelles hébergeantes. Sur ce dernier point, insistons sur le fait qu'il existe une tension forte entre rénovation et nouvelles constructions avec artificialisation des sols. Il est nécessaire que les politiques de site intègrent davantage une évaluation environnementale des projets et des décisions.

Les laboratoires devront également se préparer aux événements extrêmes amenés à devenir plus intenses et plus nombreux et risquant d'impacter leurs activités : inondation, canicule, sécheresse, pénurie d'énergie. Certains ont déjà dû adapter temporairement leurs activités de recherche du fait de sécheresse ou de la hausse des prix de l'électricité. Il semble donc essentiel que, soutenus par les tutelles, ils se préparent dès aujourd'hui en mettant en place des plans de résilience dans l'esprit des plans de prévention des risques.

MOBILITÉ ET ORGANISATION DU TRAVAIL

Concernant les missions, des systèmes de quotas d'émissions ont été mis en place, à l'échelle du laboratoire, de chaque équipe, ou de l'individu. Ces initiatives, qui ne sont qu'incitatives pour le moment, semblent relativement bien acceptées par les personnels. La décarbonation de la mobilité peut également passer par une généralisation du télétravail en prêtant attention au risque de perte de lien social et aux possibles effets rebond, comme l'étalement urbain ou l'inoccupation de locaux chauffés. Pour limiter les déplacements, les expériences effectuées à distance, notamment celles liées aux campagnes de mesure, dans les plateformes techniques ou les IR*, peuvent être également favorisées si cela ne nuit pas aux mesures elles-mêmes ou à la formation des jeunes scientifiques.

ACHATS

Les achats représentent l'un des principaux postes d'émission de la recherche,¹⁰ notamment en physique. Plusieurs initiatives de la part du CNRS visant à réduire leur impact méritent d'être mentionnées : allongement à 5 ans de garantie exigée sur le matériel informatique, présence de critères environnementaux dans les mises en concurrence, mise en place d'une bourse matériel¹¹ par le CNRS. D'autres progrès sont envisageables dans un avenir proche, comme le prolongement des garanties sur l'ensemble des marchés nationaux, la primauté donnée aux logiciels ouverts pour réduire l'obsolescence des équipements scientifiques, ou encore le développement d'approches issues de l'économie de la fonctionnalité (location par exemple) pour une partie des matériels.

Au sein des laboratoires, les initiatives qui portent sur ce poste d'émission semblent actuellement modestes, en partie en raison de la prise de conscience trop récente de l'importance des achats dans leur empreinte carbone. Plus probablement, elle reflète le fait que **les laboratoires ont peu de contrôle sur les achats effectués par leurs équipes**, notamment lorsque leurs ressources sont majoritairement contractuelles. Une réduction significative de ce poste d'émission, que permettrait par exemple une meilleure mutualisation des équipements, nécessitera donc des changements dans les modes de financement.

ÉVOLUTION DES POLITIQUES DE RECHERCHE

SUR LES MODES DE FINANCEMENT

Gains d'efficacité, miniaturisation, levée de verrous techniques ont nourri les progrès de la recherche et permettent souvent une économie de ressources pour un même usage.¹² Néanmoins, le pilotage de la recherche publique repose actuellement pour une large part sur un financement par appels d'offre compétitifs, associé à l'idée selon laquelle une forte concurrence entre acteurs garantissait une affectation optimale des ressources humaines. Si ce point de vue pouvait s'entendre dans un contexte d'abondance matérielle, un tel modèle apparaît inadapté à la situation à venir de ressources limitées et de nécessité de prise en compte des externalités négatives de la recherche. En effet, **une telle compétition ouverte, sans coordination, est par nature inefficace sinon contre-productive du point de vue de la sobriété :** elle conduit à ce que plusieurs équipements identiques puissent être achetés, que des simulations concurrentes sur des mêmes modèles soient effectuées, que des ex-

⁹ Cas du C2N : labos.point5.org/les-colloques/webinaire-reseau-2023, 2^e vidéo, à partir de 47'17"; et du LNCMI : indico.esrf.fr/event/2/contributions/110/

¹⁰ M. De Paeppe, et al., *Purchases dominate the carbon footprint of research laboratories*, bioRxiv 2023.04.04.535626

¹¹ intranet.cnrs.fr/Cnrs_pratique/acheter/boursemateriel; et dons.encheres-domaine.gouv.fr/ (pour le mobilier)

¹² Les mises à niveau des IR* vont dans ce sens. À l'inverse, la surutilisation qui peut en découler annule souvent les gains par effet rebond, comme l'illustre le domaine du numérique.

périences similaires soient menées, etc. L'individualisation des financements, à l'échelle du seul scientifique ou d'une équipe restreinte, produit également de fortes fluctuations au sein des moyens disponibles, qui sont un obstacle à une utilisation optimale et raisonnée de ressources devenues plus rares.

Valoriser l'économie de moyens pourrait s'accompagner d'une émancipation progressive du modèle actuel dans lequel la compétition aux résultats est sous-tendue par une compétition sur l'obtention de ressources matérielles et humaines. L'exemple de l'astrophysique, où certains collègues exploitent sur la durée d'anciennes données, illustre comment une telle démarche peut donner lieu à de nouveaux résultats.¹³

Une forme de planification des moyens de la recherche, associée à une coordination accrue des différents acteurs, permettraient de favoriser les dynamiques coopératives et de distribuer les ressources allouées de façon optimale et de tirer le meilleur parti de la vision globale du paysage scientifique dont disposent les organismes nationaux de recherche tels que le CNRS. La possibilité de report de crédits et une programmation budgétaire pluriannuelle des investissements faciliteraient considérablement cette démarche, ainsi que le déploiement des moyens au sein de structures fédératives favorisant la mise en commun du matériel et du personnel de soutien, mais aussi des sujets de recherche eux-mêmes (GDR).

La multiplication d'équipements semblables et la mise en concurrence sont facilitées par la coexistence de multiples échelons de financement, aux niveaux local, régional, national, européen et international, induisant redondance et complexité superflues. Un fort gain potentiel pourrait résider en une délimitation plus claire du périmètre propre de financement de chaque opérateur.

RENFORCER LE DIALOGUE AU SEIN DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE, ET AU-DELÀ

L'un des arguments en faveur de la multiplicité des guichets de financement est de libérer les chercheur·ses d'une dépendance excessive à l'égard de la direction du laboratoire et de leurs tutelles directes. Un risque possible inhérent au mode de financement proposé plus haut est donc le retour d'une forme de mandarinat doublé d'un dirigisme institutionnel accru sur la recherche. Aussi est-il impératif que cette évolution s'accompagne d'un renforcement de structures collectives (conseils de laboratoires, Comité National du CNRS, Conseil National des Universités) permettant de débattre collégialement et de manière transparente des orientations de la recherche.¹⁴

Ces espaces de délibération pourront s'assurer du maintien d'un équilibre entre recherches fondamentale et à visée applicative, dans un contexte où la demande

sociétale autour des enjeux environnementaux deviendra plus forte. Il s'agira en particulier de préserver un espace de liberté aux chercheur·ses, y compris sur des sujets sans lien direct avec les questions d'environnement et dont la part dans les sources de financement pourrait devenir excessivement réduite.

Dans un contexte de tensions sur les ressources et de crise environnementale, la recherche en physique devra par ailleurs faire preuve de transparence à l'égard du grand public. Il en va de sa capacité à maintenir un soutien de l'opinion aux efforts consentis en faveur de cette discipline, mais aussi de son attractivité vis-à-vis des jeunes générations. Ce dialogue renforcé avec la société permettra de démontrer une attention sincère aux enjeux de sobriété dans ses pratiques. Il permettra également de montrer que la physique peut apporter des réponses aux enjeux actuels qui ne sont pas seulement technologiques. Dans ce cadre, la Physique pourra être interpellée et amenée à effectuer une évaluation critique de ses grands domaines de recherche aux enjeux élevés et bénéficiant de financements spécifiques, y compris sur les sujets liés à l'énergie, dans le but d'éclairer la réalité des impacts socio-environnementaux de ces recherches et de leurs éventuelles retombées technologiques.

VERS DE NOUVEAUX OBJETS DE RECHERCHE

S'il est clair que certains objets d'étude imposent des choix techniques et organisationnels, les pratiques et le développement de nouveaux instruments guident en retour les choix de sujets. **Une société plus sobre imposera d'inventer une physique plus sobre dans ses pratiques, mais aussi renouvelée dans ses sujets.** Compte tenu du rythme élevé de réduction des émissions qui sera nécessaire, il semble en effet difficile d'imaginer que l'évolution de la physique ne puisse procéder que par adaptation progressive. **Il nous revient donc dès à présent d'imaginer ce que pourrait être une physique «frugale», ou physique «bas carbone».** Dans cette perspective, la physique pourrait par exemple s'inspirer d'une partie de la chimie qui a vu se développer depuis les années 1990 une «chimie verte» fondée sur un certain nombre de principes visant à réduire et éliminer l'usage ou la production de substances néfastes pour l'environnement, et promouvant plus généralement l'économie de moyens.

Un levier pour encourager une telle évolution serait d'associer ces changements de pratiques à des projets de recherche intra ou inter-équipes ou inter-laboratoires, y compris hors du champ disciplinaire traditionnel de la physique, par exemple en relation avec les sciences humaines. Les réflexions et les solutions ainsi développées constituent en soi un progrès des connaissances et ont vocation à être partagées et diffusées au-delà du monde de la recherche.

¹³ www.nature.com/articles/d41586-023-00837-0

¹⁴ Cette nécessité rejoint les recommandations exprimées par le COMETS dans son récent rapport (voir note page 101).

RESSOURCES HUMAINES ET CARRIÈRES

La politique de ressources humaines jouera un rôle clé pour réduire l'impact environnemental des laboratoires tout en maintenant une recherche de haut niveau.

UNE POLITIQUE DE L'EMPLOI AU SERVICE D'UNE MEILLEURE UTILISATION DES MOYENS MATÉRIELS

Infrastructures et équipements pèsent lourd dans le bilan écologique de CNRS Physique. **Un gisement important d'économie en ressources est une meilleure gestion et utilisation du parc de matériel existant** au travers d'une maintenance plus suivie, des achats groupés (magasins sur site), des réparations en interne. **Cela nécessitera une redéfinition des missions des personnels de soutien doublée d'une politique ambitieuse de recrutements pérennes.** Il est en effet illusoire de penser que les personnes actuellement en poste pourront seules absorber la charge de travail supplémentaire qu'impliquent ces mesures. Le recours actuel aux bonnes volontés a atteint ses limites : de nombreux témoignages pointent l'épuisement de personnels surchargés par le travail supplémentaire que ces missions induisent, nuisant à l'accomplissement de leurs missions premières. L'accompagnement de ces évolutions devra faire l'objet d'une attention particulière par les établissements de recherche.

ACCOMPAGNER LES AGENTS DÉSIREUX D'ADAPTER LEUR PRATIQUE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

La qualité de la recherche au CNRS reflète pour l'essentiel le talent et l'enthousiasme de ses agents. Le spectre scientifique du CNRS, la liberté qu'il laisse à ses personnels sont des atouts d'attractivité uniques permettant de compenser des salaires relativement modestes. Mais au-delà de cette liberté, **la question du sens de leur mission est centrale pour les personnels.** La conviction de participer à une œuvre enrichissante et chargée de sens est remise en question par beaucoup au regard de l'urgence climatique. Ce questionnement peut prendre différentes formes, depuis le besoin d'agir à l'échelle du laboratoire, jusqu'au désir de redéfinir totalement ses activités au sein ou hors du CNRS.

Le niveau de remise en question le plus courant actuellement est le besoin d'aligner sa pratique professionnelle avec une démarche personnelle de réduction d'impact : les personnels concernés s'impliquent alors spontanément dans la transition des laboratoires, comme décrit plus haut, souvent de façon totalement désintéressée, mais pouvant aussi, légitimement, susciter l'espoir d'une certaine reconnaissance pour cet investissement.

Nombreux aussi sont celles et ceux qui questionnent le sens même de leur sujet d'étude et opèrent des ré-

orientations thématiques tout en restant proches de leurs domaines d'expertise. Ces réorientations sont relativement simples et il est donc difficile d'obtenir des données chiffrées sur leur ampleur. Elles peuvent être facilement valorisables lorsqu'elles restent dans le champ même de la discipline, mais peuvent être plus délicates (financement, évaluation) lorsqu'elles explorent des approches nouvelles qui sortent du cadre scientifique standard (*low techs* par exemple). Certaines nouvelles thématiques situées à l'interface de plusieurs instituts du CNRS partagent les difficultés de reconnaissance et de positionnement propres aux sujets interdisciplinaires.

Certains agents peuvent enfin bifurquer¹⁵ vers des thématiques tournées vers les enjeux planétaires, loin de leur discipline d'origine. Les instances du CNRS ne recensent à l'heure actuelle qu'un nombre très limité de demandes de changement de comité d'appartenance au CNRS ou de départ du CNRS rentrant dans ce cadre. Il n'est cependant pas exclu qu'un nombre croissant d'agents expriment le souhait d'abandonner progressivement leur thématique de recherche en physique pour s'impliquer davantage dans des recherches à caractère sociétal. Il est important que les agents puissent assumer ces changements de façon claire et transparente et qu'ils soient accompagnés au mieux dans leur démarche.

Apporter une réponse adéquate à ces questionnements sera l'un des enjeux majeurs auquel le CNRS sera confronté lors de la prochaine décennie. Si elles sont accompagnées et valorisées, ces évolutions individuelles peuvent à la fois répondre à la question du sens, mais aussi ouvrir des pistes nouvelles de recherche qui enrichiront les disciplines et renforcer l'attractivité de la Physique vis-à-vis d'étudiant-es de plus en plus sensibles à ces questions. À l'inverse, si ces questionnements des personnels ne font pas l'objet d'une écoute attentive de la part de l'institution, il existe un risque réel de démission, d'isolement des personnels ou même de *quiet quitting*, ainsi que des difficultés accrues de recrutement de doctorant.e.s, qui pourraient à échéance plus ou moins longue compromettre la dynamique interne des laboratoires.

FAIRE ÉVOLUER LES MODALITÉS D'ÉVALUATION DES MÉTIERS DE LA RECHERCHE

Inciter les personnels techniques à agir en faveur des changements décrits plus haut implique que soient mieux reconnues les actions de maintenance, réparation, adaptation des équipements de recherche, mais aussi d'entretien des bâtiments et de leurs infrastructures. Cette valorisation doit faire jeu égal, pour les évolutions de carrière, avec le montage de nouveaux équipements ou la gestion de grands projets techniques,

¹⁵ lemonde.fr/sciences/article/2022/06/27/ces-chercheurs-tentes-par-la-bifurcation-ecologique_6132235_1650684.html

actuellement bien mieux perçus. Le rôle de référent développement durable devrait également être systématiquement reconnu.¹⁶

Pour les personnels de recherche, l'enjeu est de favoriser et valoriser les actions en faveur de pratiques compatibles avec les enjeux environnementaux, tant pour soutenir les agents déjà engagés que pour favoriser l'engagement de tous dans cette transition. L'un des leviers importants est de cesser de lier la qualité de la recherche au volume de financement obtenu : les moyens financiers sont devenus une mesure de l'excellence de la recherche et ont contribué à forger l'image du *principal investigator* (PI) comme étalon de cette excellence, alors que la transition écologique impose de valoriser la frugalité et l'économie de moyens. Une reconnaissance accrue de l'usage parcimonieux des ressources, une pratique active de la recherche non limitée à de l'encadrement exclusif et mettant en avant la coopération au sein de projets collectifs mutualisant les moyens matériels et compétences apparaissent comme des objectifs salutaires à cet égard. Notons que ceux-ci rejoignent les diagnostics et recommandations pour une évaluation non discriminatoire, en particulier concernant l'équilibre entre dimensions individuelle et collective de l'évaluation.¹⁷

La sensibilisation accrue aux questions de soutenabilité lors de l'évaluation des carrières se posera d'emblée lors des recrutements, aussi bien pour les chercheurs que les personnels de soutien à la recherche. Sans limiter le spectre des compétences à recruter, et en relation avec la désaffection possible évoquée plus haut d'une partie du vivier, il sera essentiel de favoriser l'entrée de nouvelles recrues portant des projets compatibles avec la transition énergétique et environnementale du point de vue des applications ou de nouvelles pratiques en recherche.

ENJEUX SPÉCIFIQUES DES GRANDES INFRASTRUCTURES ET DU NUMÉRIQUE

TRÈS GRANDES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE (IR*)

Les IR* peuvent être considérées comme un modèle d'utilisation partagée d'un même instrument par la communauté. Néanmoins, compte tenu du poids significatif des grands instruments dans le bilan environnemental de la recherche en physique, ils doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Le CERN, les infrastructures d'astrophysique et de physique des particules, l'ESRF, l'ILL et le laboratoire LNCMI font partie des infrastructures pour lesquelles des BGES

sont disponibles.¹⁸ Comme attendu, la consommation électrique y est un poste clé. En France, l'électricité étant peu carbonée, il s'ensuit des émissions plus faibles qu'à l'étranger (USA, Royaume-Uni, Allemagne...). Dans les années à venir, l'accès à la ressource électrique va néanmoins devenir de plus en plus sollicitée du fait de la nécessité de décarbonation de nombreux secteurs (transports, industrie, chauffage). Il n'est pas exclu que cette concurrence entre IR* et autres usages électriques aboutisse à la nécessité de périodes d'arrêts et conduise à une sélection plus drastique des projets de recherche.

Un point d'attention est également le risque d'une augmentation en fréquence et en intensité d'événements climatiques pouvant affecter les infrastructures (incluant les centres de calculs et de données). Il paraît indispensable de mettre en place les plans de prévention de ces risques.

Parmi les évolutions possibles, il serait d'emblée important d'intégrer davantage les IR* au sein de la société : valorisation de leur chaleur fatale, organisation collective de la possibilité d'interruptions des expériences lors des périodes de tension sur les réseaux électriques ou sur les ressources, etc. Dans le cadre de la réduction de leur consommation électrique, différents leviers techniques peuvent être identifiés. Ainsi, la mise à niveau récente de l'ESRF a permis de réduire la consommation tout en augmentant la luminosité de l'instrument. Une forte consommation énergétique peut être associée à des choix de conception (*European Spallation Source* par exemple), qui pourraient être remis en cause dans le futur. Des évolutions de l'organisation pourraient aussi permettre de profiter au mieux des appareils existants, avec un recrutement de technicien·nes de maintenance et d'opérateur·rices qui pourrait s'avérer un levier essentiel.

L'augmentation de la puissance et de développement des nouveaux instruments s'accompagne par ailleurs d'une augmentation forte du volume de données, nécessitant à son tour l'implantation de *datacenters* dédiés dont le coût environnemental sera élevé.

ENJEUX DU NUMÉRIQUE

Le numérique et son usage omniprésent dans la recherche scientifique possèdent également leurs enjeux spécifiques. Non seulement l'ensemble des personnels utilisent ordinateurs, réseaux et logiciels pour leurs tâches quotidiennes, mais la simulation et le stockage

¹⁶ Voir aussi la recommandation du 2/2/2023 du conseil scientifique de l'INP : cnsr.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/INP/CSI_INP_Recommandation_referents_dev_durable.pdf

¹⁷ Jalowiecki-Duhamel, *et al.*, Parité et évaluation non-discriminatoire au CNRS. [Rapport Technique] Comité Parité, Section 14, Comité National de la Recherche Scientifique CoNRS (mandature 2016-2021), 2021. hal-03311372

¹⁸ hse.cern/environment-report-2019-2020/emissions; arxiv.org/abs/2203.12389; arxiv.org/abs/2201.08748; esrf.fr/files/live/sites/www/files/Infrastructure/Safety/Bilan%20GES%20ESRF%20-%20C3%A9%202018.pdf; bilans-ges.ademe.fr/bilans/consultation/9395db73-b1cd-11ed-8fce-005056b7acd1/fiche-identite

de données prennent également une part croissante dans la recherche en physique, aux côtés de la théorie et de l'expérimentation. Grâce aux travaux du GDS EcoInfo,¹⁹ il a été montré que le numérique pèse 2 à 4 % des émissions mondiales et 10 % de la consommation électrique en France, et est en très forte croissance.

La part liée à la fabrication du matériel est prépondérante et laisse entrevoir des tensions futures sur certains matériaux (pour l'électronique, les batteries, etc.). Une meilleure politique d'achat et de maintenance pourrait améliorer significativement ce poste : garantie étendue, jouvence raisonnée, mutualisation, achat de matériel d'occasion, analyse systématique du cycle de vie du matériel, etc. De telles démarches supposent que les laboratoires aient une visibilité financière suffisante afin de planifier leurs investissements sur plusieurs années.

La part des données est aussi en forte croissance et devrait encore augmenter à l'avenir (données massives issues des grands instruments, déploiement de l'intelligence artificielle). Concernant la Physique, ces données doivent être conservées sur le long terme pour pouvoir être (ré)exploitées ultérieurement. Leur stockage doit donc être fiable mais aussi économe. Les données ne doivent ainsi pas nécessairement être disponibles instantanément mais pourraient être rendues accessibles en quelques jours (données dites froides). Pour répondre à ce défi, les organismes de recherche doivent se doter de véritables plans de gestion de données.

La simulation numérique requiert la même planification face à un développement rapide : la France va accueillir une machine exascale (Jules Verne) dont la consommation annuelle pourrait égaler celle de l'ensemble des laboratoires du CNRS.²⁰ La hausse de consommation d'énergie des centres de calculs, qui offrent un exemple particulier de grande infrastructure de recherche, est par ailleurs vertigineuse : l'IDRIS consommait 1200 kW en 2008, 2500 kW en 2011 et 4500 kW en 2023. Le coût complet GES d'une heure de calcul sur un cœur, estimé à 5 gCO₂e dans un mésocentre,²¹ conduit à des émissions importantes pour les grands projets représentant typiquement 10 millions d'heures.

Enfin, rappelons que les avancées majeures en simulation numérique doivent davantage aux progrès algorithmiques qu'à ceux des calculateurs. En outre, la loi de Koomey²² montre qu'à énergie constante, la capacité de calculs double tous les 18 mois. Développer une informatique frugale n'implique donc pas nécessairement une course à des machines de plus en plus grosses, et les efforts de certains centres de calcul pour optimiser les ressources en recyclant par exemple la chaleur fatale (exemple du calculateur Jean Zay) sont à saluer.



Préparation de l'avion Falcon 20 instrumenté du SAFIRE lors de la campagne Exaédre. © Cyril FRESILLON / EXAEDRE / SAFIRE / CNRS Images

¹⁹ ecoinfo.cnrs.fr

²⁰ Le programme HPC recommande de ne pas dépasser 20 MW, soit 175 GWh par an pour une utilisation continue.

²¹ hal.science/hal-02549565. L'analyse faite par GENCI est comparable (5 tCO₂e par projet en moyenne, allant jusqu'à 50 tCO₂e pour les très fortes demandes)

²² fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Koomey



Remerciements

CNRS Physique remercie très chaleureusement les pilotes des différents ateliers et leurs bureaux. Le très gros travail qu'ils ont effectué a conduit à la base de ce document de prospective.

ÉLECTRONIQUE ET PHOTONIQUE AVANCÉES

Pilotes: Sophie Bouchoule et Frédéric Teppe

Membres du bureau: Nicolas Bonod, Olivier Bourgeois, Olivier Fruchart, Noelle Gogneau, Milan Orlita et Fabrice Raineri

Correspondant CNRS Physique: Frédéric Petroff

PHYSIQUE EN RÉGIMES EXTRÊMES

Pilotes: Valérie Blanchet et Marc-Henri Julien

Membres du bureau: Eddy Collin, Sébastien Corde, François Guyot, Stefan Hüller et Maciej Lorenc

Correspondant CNRS Physique: Antoine Rousse

PHYSIQUE DES SYSTÈMES COMPLEXES

Pilotes: Cécile Appert-Rolland et Julien Barré

Membres du bureau: Francesca Chilla, Eric Falcon, Jean-Pierre Nadal, Estelle Pitard et Salima Rafai

Correspondante CNRS Physique: Annick Lesne

PHYSIQUE DE LA MATIÈRE COMPLEXE

Pilotes: Isabelle Cantat et Olivier Pouliquen

Membres du bureau: Sophie Marbach, Benoît Roman, Thomas Salez, Jérôme Weiss et Christophe Ybert

Correspondant CNRS Physique: Benoît Devincere

MATIÈRE, LUMIÈRE ET PROCESSUS QUANTIQUES

Pilotes: David Carpentier et Caroline Champenois

Membres du bureau: Manuel Bibes, Frédéric Chevy, Sophie Guéron et Anne Zehnacker-Rentien

Correspondant CNRS Physique: Florent Calvo

PHYSIQUE DU VIVANT

Pilotes: Anne Charrier et Andrea Parmeggiani

Membres du bureau: Carine Douarche, Karine Guevorkian, Xavier Noblin, Paolo Pierobon et Jean-Paul Rieu

Correspondante CNRS Physique: Cécile Sykes

LOIS FONDAMENTALES

Pilotes: Fawzi Boudjema et Saïda Guellati-Khelifa

Membres du bureau: Sébastien Bize, Benoît Darquié, Julien Lesgourgues, Danièle Steer et Pierre Vanhove

Correspondants CNRS Physique: Matteo Cacciari et Laurent Lellouch

NOUVEAUX ENJEUX POUR LES MÉTHODES NUMÉRIQUES

Pilotes: Fabien Alet et Lucia Reining

Membres du bureau: Arnaud Beck, Magali Benoît, Benoît Blossier et Giuseppe Foffi

Correspondant CNRS Physique: Bertrand Georgeot

PHYSIQUE POUR LA SANTÉ

Pilotes: Jean-François Aubry et Kheya Sengupta

Membres du bureau: Florence Gazeau et Sylvain Miraux

Correspondantes CNRS Physique: Thérèse Huet et Cécile Sykes

PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LE CLIMAT

Pilotes: Bérengère Dubrulle et François Ozanam

Membres du bureau: Hervé Bercegol, Livia Bové, Freddy Bouchet, Emmanuelle Deleporte, Pascale Hennequin et Mathieu Salanne

Correspondants CNRS Physique: Kees van der Beek et Annick Lesne

PHYSIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT, L'URBAIN ET L'ALIMENTATION

Pilotes: Pascale Fabre et Arnaud Saint-Jalmes

Membres du bureau: Monique Axelos, Guillaume Duflos, Roland Pellenq, Laurence Ramos et Matthieu Van Damme

Correspondant CNRS Physique: Benoît Devincere

CNRS Physique remercie également très chaleureusement l'ensemble des physiciennes et physiciens de la communauté qui se sont investis à différentes étapes du processus permettant la rédaction de ce document final.

Nous remercions aussi Marie-Herlyne Dumoulin et Florence Thépenier pour le soutien dans l'organisation.

Tout au long du travail de prospective, CNRS Physique a bénéficié de l'aide précieuse du Pôle communication. Que Jean Farago, Séverine Martrenchard, Vincent Planche-nault, Lauren Puma, Linda Salvaneschi, Marie Signoret en soient remerciés chaleureusement.

PHYSIQUE POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ET LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

Pilotes: Thierry Lahaye et Isabelle Robert-Philip

Membres du bureau: Eleni Diamanti, Jean-Yves Duboz,
Benjamin Huard et Frédéric Van Dau

Correspondant CNRS Physique: Sébastien Tanzilli

CULTURE SCIENTIFIQUE

Pilotes: Daniel Hennequin et Nathalie Lidgi-Guigui

Membres du bureau: Jean-Michel Courty
et Hélène Fisher

Correspondant CNRS Physique: Frédéric Restagno

PARITÉ ET DIVERSITÉ(S)

Pilotes: Benoît Blossier et Nadine Halberstadt

Membres du bureau: Xavier Chaud,
Nathalie Lidgi-Guigui, Sophie Marbach et Thierry Mora

Correspondant CNRS Physique: Bertrand Georgeot

INTÉGRER LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX À LA RECHERCHE EN PHYSIQUE

Pilotes: Georges Debregeas et Emmanuelle Lacaze

Membres du bureau: Christophe Arnold,
Sylvain Capponi, Delphine Debarre, Laëtitia Marty
et Guillaume Roux

Correspondant CNRS Physique: Sylvain Ravy







Pour consulter la version numérique



3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
+ 33 1 44 96 40 00
www.inp.cnrs.fr/fr | [@CNRSphysique](https://twitter.com/CNRSphysique)