

SECTION 05

MATIÈRE CONDENSÉE : ORGANISATION ET DYNAMIQUE

Composition de la section

Jean-Louis BARRAT (président de section); Cécile DELACOUR (secrétaire scientifique de 2021 à 2023); Pierre ILLIEN (secrétaire scientifique de 2023 à 2025); Grégory ABADIAS; Jean-François BARDEAU; Étienne BRASSELET; Grégory CABAILH; Virginie CHAMARD; Vincent DÉMERY; Michel DROUET; Olivia DU ROURE; Ovidiu ERSEN; Étienne GAUFRÈS; Andrea GAUZZI; Amélie JUHIN; Marie-Caroline JULLIEN; Mathieu KOUDIA; Samy MERABIA; Sophie MEURET; Franck PARA; Laurence TALINI; Raphaël VOITURIEZ.

Introduction

La section 05 regroupe près de 300 chercheurs. Environ 600 enseignants-chercheurs (EC) figurent sur les listes électorales de la section, mais il est difficile d'estimer précisément la réalité scientifique associée à ce rattachement, et le nombre d'EC réellement concernés par la section. Les chercheurs sont répartis dans environ 60 unités de recherche, dont un tiers n'a pas CNRS Physique comme institut de rattachement, ce qui reflète un caractère fortement interdisciplinaire des activités de la section.

Les thématiques abordées sont, en effet, sensiblement plus larges que ne le laisserait supposer l'intitulé historique de la section, « Matière condensée, organisation et dynamique ». Une

grande partie des activités de la section s'est en effet tournée depuis longtemps vers les nanosciences. Une autre partie, de plus en plus importante, concerne les thématiques « systèmes complexes », « matière complexe » et « biophysique » (en se référant aux thématiques des prospectives 2023 de CNRS Physique), qui ne font pas partie de ce qui est habituellement associé à la physique de la matière condensée traditionnelle. Aujourd'hui, celle-ci représente environ 25 % des activités, avec un poids variable suivant les générations.

À l'heure où une refonte des périmètres des sections est évoquée, on peut noter que cette évolution, qui s'est faite naturellement et progressivement au cours des 20 ou 25 dernières années, a profondément modifié celui de la section 5. Elle n'est pas sans poser de questions, également évoquées au cours des

prospectives de CNRS Physique, sur la pérennité de certaines thématiques, par exemple, au sens assez large, la science des matériaux, et sur le renouvellement des générations au sein des laboratoires traditionnellement associés à ces thématiques.

Parmi les évolutions des activités des chercheurs de la section, on peut également noter une importance croissante des activités théoriques et numériques, qui représentent aujourd'hui environ 30% de la section, parfois combinées avec une activité expérimentale.

Ces différents aspects sont reflétés, au niveau des concours de recrutement des chargés de recherche, par de très nombreuses candidatures simultanées associant la section 05 à une ou plusieurs autres sections ou CID, et tout particulièrement les sections 02, 09, 10, 11, la CID 54 et dans une moindre mesure la CID 51.

Le présent rapport de conjoncture est organisé suivant quatre grands secteurs d'activité : état solide, surfaces et nano-objets, matière complexe, physique du vivant. Il ne s'agit pas de présentations exhaustives des activités de la section dans le domaine concerné, mais plutôt d'une mise en avant des thématiques les plus actuelles. Une section complémentaire souligne l'importance d'activités transverses à ces différentes thématiques. Deux sections consacrées aux problématiques de parité et de sobriété énergétique, et à leur prise en compte par la section, concluent le rapport.

I. Structure et dynamique de l'état solide

Une partie significative des activités de recherche relevant de la section 05 porte sur la structure et la dynamique de l'état solide. Cette activité regroupe l'étude expérimentale, numérique et théorique de la relation entre les propriétés statiques et/ou dynamiques de la matière condensée et sa structure. Le spectre

des propriétés étudiées est très large – allant des propriétés mécaniques, optiques, électroniques, magnétiques aux propriétés de transport – tout comme celui des systèmes étudiés, qui inclut les états solides cristallin et amorphe/désordonné, ainsi que les matériaux massifs comme les nanomatériaux. Ces systèmes recouvrent des matériaux modèles pour les études fondamentales, des matériaux fonctionnels, du patrimoine culturel ou industriel, quantiques ou encore des biomatériaux. Les caractérisations expérimentales s'appuient sur des instruments disponibles au laboratoire – pour certains, spécifiquement conçus pour des observations à l'état de l'art – d'autres accessibles par des plateformes locales ou réseaux nationaux et les grands instruments. La modélisation s'appuie sur des approches théoriques et numériques variées, à différentes échelles de temps et d'espace (cf. partie IV.B « développements numériques »), grâce aux ressources de calcul locales et nationales.

Le rôle des défauts, interfaces, dopants, mélanges de phases et de la dimensionnalité, l'étude des phonons, l'influence des conditions extrêmes de température et/ou de pression restent des sujets toujours très étudiés bien qu'historiques de la section. Parmi les thèmes de recherche en essor, sans être exhaustif, on peut citer l'étude de la dynamique ultrarapide du magnétisme et des phonons, stimulée par les récentes opportunités sur les nouvelles sources de rayons X, la dynamique hors équilibre et la recherche d'états métastables forcés, l'étude de la dynamique à l'échelle du nanomètre en nano-optique, le rôle des effets quantiques sur la structure et la dynamique de la matière, la compétition entre les différents types de mises en ordre ou encore les effets anharmoniques sur les propriétés de transport. Notons aussi le dynamisme des développements théoriques et méthodologiques pour la modélisation des matériaux et de leurs propriétés (par exemple, autour des approches à N-corps pour décrire les propriétés optoélectroniques de systèmes complexes désordonnés), l'essor des approches de type *machine learning* ou encore l'émergence de « jumeaux numériques » couplés aux expériences. Sur le plan expérimental, les progrès remarquables

réalisés en matière d'instrumentation ont permis en particulier de repousser les échelles temporelle et spatiale accessibles à celles de l'atome et de la femtoseconde, d'accéder à la structure tridimensionnelle ou encore d'étudier les matériaux dans des conditions réalistes ou fonctionnelles (études *in situ* et *in operando*). Les approches corrélatives combinant plusieurs techniques, parfois en une seule et même expérience, sont de plus en plus utilisées.

La communauté de la section relevant de cette thématique est large, de par la diversité des propriétés et des matériaux étudiés ainsi que des approches utilisées. Elle est organisée autour d'un grand nombre de fédérations de recherche (FR) et de groupements de recherche (GDR) très actifs dans l'animation scientifique et dans la formation grâce à l'organisation d'écoles thématiques. Aux GDR MEETICC (Matériaux, états électroniques, interactions et couplages non conventionnels) et ModMat (Modélisation des matériaux), sont venus s'ajouter les nouveaux GDR créés depuis 2021 : MATEPI (Matériaux épitaxiés), CHALCO (Matériaux chalcogénures), IAMAT (Intelligence artificielle en sciences des matériaux), HEA (Alliages à haute entropie), (CMC)² (Composites à matrice céramique : conception, modélisation, caractérisation) et SoPhy (Soft Physics for Hard Materials).

La thématique « structure et dynamique de l'état solide » est à l'intersection de plusieurs autres sections du CoNRS. Ainsi, les matériaux quantiques, supraconducteurs, multiferroïques, magnétiques, topologiques ou multifonctionnels sont communs avec la section 03 et relèvent de la section 05 lorsqu'ils sont étudiés en relation avec la structure et/ou la dynamique. Il existe par ailleurs un recouvrement avec les activités des sections 02 (théorie de la matière condensée), 04 (nano-optique, optique ultrarapide), 08 (dispositifs électroniques, spintronique), et 15 (synthèse chimique, matériaux fonctionnels).

II. Physique des surfaces et nano-objets

Une part significative des chercheurs de la section 05 se concentre sur la physique des systèmes de faible dimensionnalité, en particulier les surfaces et les nano-objets, explorés à la fois théoriquement et expérimentalement. L'intérêt des chercheurs porte sur le contrôle de leur fabrication, la compréhension de leurs propriétés physiques et structurales, ainsi que sur les phénomènes spécifiques à l'échelle nanométrique. L'engagement durable dans les nanosciences a stimulé la diversification des domaines de recherche, en exploitant les avancées dans la caractérisation des propriétés et la découverte de nouveaux systèmes. L'émergence des hétérostructures, résultant de l'empilement d'objets de différentes dimensions, ouvre de nouvelles possibilités entre le macroscopique et le nano-objet, avec des propriétés adaptables selon la configuration. L'ingénierie des surfaces, des interfaces et des défauts offre également des opportunités pour de nouvelles fonctionnalités. Dans la suite, quelques exemples de systèmes nanostructurés et/ou de basse dimensionnalité sont présentés, mettant en avant leurs propriétés physiques et leurs applications.

Dans le domaine des nano-objets, les avancées portent sur la maîtrise de leur synthèse et leur variété structurale croissante. Des nanoparticules isolées aux nanotubes, différentes approches physiques ou physico-chimiques sont explorées. Les études se concentrent sur leurs propriétés optiques, influencées par le confinement stérique, diélectrique et plasmonique, permettant une focalisation des champs électromagnétiques à l'échelle nanométrique. De plus, leurs caractéristiques mécaniques, leur plasticité et leur rhéologie sont étudiées pour développer des matériaux de renforcement résistants. Ces systèmes nanométriques modulables trouvent de vastes applications en biologie et en médecine, soulevant également des questions cruciales sur les phénomènes de diffusion dans des environnements complexes.

À un degré de complexité plus important, l'étude des nanostructures monophasées ou hybrides (de type métal-semi-conducteur ou métal-oxyde) a permis d'obtenir des avancées considérables dans l'étude des effets de confinement électronique ou optique, des processus de couplage collectifs ou de transfert d'énergie à l'échelle nanométrique. Les nanostructures semi-conductrices, grâce aux perspectives qu'elles ouvrent en physique fondamentale (comme source de photon unique ou super-dipôles par exemple) et aussi pour les applications en microélectronique (nouveaux bits quantiques), prennent toujours une place importante dans les activités des chercheurs de la section. Pour optimiser les propriétés de ces nanostructures, le développement des techniques d'épitaxie se poursuit, permettant d'obtenir de nouveaux systèmes comme les hétérostructures HEMT (transistors à électrons de haute mobilité, un exemple typique étant AlGaN/GaN) ou les semi-conducteurs à bande interdite ultralarge (Ga₂O₃). De nouvelles hétérostructures pour le magnétisme et la spintronique sont également en cours d'investigation. Elles sont basées sur l'utilisation d'oxydes de type grenats d'yttrium fer (YIG), par exemple, dont l'interaction forte entre leurs degrés de liberté (spin, charge, moment orbital) permet un contrôle ultrarapide de l'aimantation.

La recherche sur les matériaux bidimensionnels (2D) a pris son essor il y a environ vingt ans avec la découverte du graphène, et elle s'est considérablement diversifiée depuis. Ces matériaux offrent des propriétés uniques, principalement induites par leur topologie 2D spécifique dans la structure de leur bande électronique et phononique. Parmi eux, le nitrure de bore hexagonal (h-BN) a suscité un grand intérêt en raison de ses propriétés optiques et électroniques prometteuses, notamment dans les applications telles que les barrières dans les vannes de spin. Les recherches actuelles se concentrent sur les semi-conducteurs de dichalcogénures de métaux de transition (TMD), tels que les MoS₂, WS₂ et WSe₂, en particulier sur leur élaboration à grande échelle et leur transfert sur des puces de silicium. Ces matériaux présentent un gap direct à l'état

monocouche et une énergie de liaison des excitons élevée, ce qui les rend particulièrement attractifs pour l'optoélectronique. Les chercheurs explorent de nouvelles orientations, notamment l'enrichissement des propriétés par des effets de proximité et la manipulation de la topologie de la structure de bande électronique à l'aide d'adsorbats. L'intégration de ces matériaux dans des architectures hybrides ou des hétérostructures 2D ouvre de nouvelles perspectives en ingénierie électronique et photonique, en exploitant des phénomènes tels que les propriétés de commensurabilité aux interfaces ou les phénomènes de moiré. Outre les TMD, la recherche s'intéresse à des matériaux 2D plus innovants, comme les supraconducteurs à haute température critique et les hétérostructures semi-conductrices à base de GaN. Les matériaux pour la ferroélectricité, tels que le SnSe et le SnTe, attirent également l'attention en raison de leurs propriétés spécifiques, offrant de nouvelles opportunités en microélectronique et en photonique. Cependant, des défis subsistent, notamment la stabilisation de l'ordre ferromagnétique à longue distance dans les matériaux telluriques à l'échelle de la monocouche, nécessitant un contrôle précis de leur structure et de leur stœchiométrie.

Les systèmes moléculaires sont aussi au centre des préoccupations des chercheurs de la section, notamment grâce à l'électronique moléculaire et aux techniques de microscopie et spectroscopie à effet tunnel permettant d'étudier des molécules uniques ou des assemblées déposées sur des surfaces. Cela permet d'accéder à une physique riche à l'échelle moléculaire, explorant le couplage magnétique, l'influence des défauts de surface et la conductance électrique à travers diverses molécules comme le C₆₀ ou les phthalocyanines, ainsi que de nouvelles molécules photomagnétiques ou à commutation moléculaire. Une attention particulière est portée aux systèmes moléculaires intermédiaires pour analyser la relation structures-propriétés en fonction de la dimensionnalité, avec le développement de méthodes de fonctionnalisation de surface pour diverses applications.

Parallèlement, la communauté s'intéresse à l'étude des processus physiques ou chimiques induits par la présence d'une surface ou par la nanostructuration, comme le mouvement de particules sur des surfaces simples ou nanostructurées. Cette recherche explore les forces motrices à l'origine de ces déplacements, leurs cinétiques et leurs applications potentielles. L'étude des processus de germination et de transport en milieu confiné dans les matériaux nanostructurés, tels que les biomatériaux ou les matériaux poreux complexes, permet de mieux comprendre leurs propriétés et envisager de nouvelles applications, tout en approfondissant les lois de nucléation et de diffusion de la matière.

En parallèle des recherches sur les nano-objets et nanostructures complexes, de nouvelles méthodes d'élaboration émergent, avec un découplage de techniques. Des approches hybrides, combinant synthèse chimique *bottom-up* ou *top-down* avec des méthodes de croissance par épitaxie ou implantation ionique, sont de plus en plus utilisées. Des progrès significatifs sont également réalisés dans la simulation de la structure et des propriétés, visant à traiter des systèmes avec un nombre croissant d'atomes et à comprendre l'effet du confinement nanométrique sur les excitations. De nombreux groupes travaillent sur le développement d'algorithmes et de stratégies de calcul pour aborder les questions de structures et de processus optiques dans des systèmes complexes, en utilisant des techniques avancées de projection, d'intégration et d'approches multi-échelles, ainsi que l'intelligence artificielle pour accélérer les calculs.

Du point de vue expérimental, le développement de nouveaux outils d'analyse et de caractérisation reste un défi majeur. Les avancées concernent les dispositifs de mesure des propriétés de transport à l'échelle de la nanoparticule ou de la molécule, ainsi que les spectroscopies optiques résolues en temps et spatialement, les microscopies et spectroscopies électroniques ou en champs proche, et les techniques synchrotron de diffraction ou de spectroscopie. Ces progrès, notamment en résolution spatiale, spectrale et temporelle,

ouvrent de nouvelles voies pour revisiter la physique de surface et les processus physiques à petite échelle. À titre d'exemple, le suivi *in situ* des cinétiques de mécanismes réactionnels et de la croissance de nanostructures en microscopie électronique, ou la localisation et la quantification de l'hydrogène dans différentes nanostructures *via* la sonde atomique tomographique, représentent des avancées significatives.

III. Matière molle et systèmes complexes

La matière molle désigne l'étude de systèmes présentant des comportements entre solide et liquide, ou ayant lieu à des échelles d'énergie comparable à l'énergie thermique à température ambiante. Si les polymères et les cristaux liquides ont été historiquement parmi les premiers objets « mous » étudiés par les physiciens, on trouve aujourd'hui dans cette thématique les systèmes complexes et hors équilibre (dissipatifs), tels que les verres, les colloïdes, les mousses, les gouttes, les suspensions, les gels, les milieux granulaires, les films, les membranes, etc. La description de leur dynamique requiert souvent, pour faire le lien avec les propriétés de leurs constituants microscopiques, la combinaison de la physique statistique avec l'hydrodynamique et la mécanique du solide. Ces activités de recherche impliquent aussi bien des groupes expérimentaux que théoriques, et requièrent des niveaux de description à de multiples échelles de temps et d'espace. Le spectre des techniques couvert par cette thématique est donc particulièrement large, et permet traditionnellement des échanges très fructueux entre théoriciens et expérimentateurs.

Au sein de la thématique « matière molle et systèmes complexes », les sujets de recherche « classiques » restent particulièrement bien représentés et dynamiques. Parmi eux, on

Comité national de la recherche scientifique

peut citer les systèmes impliquant des interfaces molles, comme les gouttes liquides ou les bulles ; les systèmes divisés, avec un intérêt particulier pour les milieux granulaires humides ou les radeaux granulaires ; les systèmes amorphes ou désordonnés, en particulier par des approches théoriques ou numériques, et des développements algorithmiques poussés ; les systèmes sous confinement micro- ou nanométrique. La matière active, qui avait émergé comme une thématique d'intérêt pour les physiciens statisticiens au début des années 2010, concentre toujours beaucoup d'activité, aussi bien sur le plan théorique que sur le plan expérimental, avec des développements récents sur la mise au point de solides ou de nouveaux matériaux actifs. Parmi les thématiques émergentes, on peut également citer la mécanique des coques minces, avec des applications dans la *morphing* ou la génération de structures à la demande, ou plus généralement l'étude des interactions fluide-structure, à travers les phénomènes de morphogénèse ou d'élastocapillarité. On note également un intérêt croissant pour les applications de la matière molle vers des questions de conversion et de stockage d'énergie, par exemple à travers l'étude des écoulements fluides à l'échelle nanométrique, qui traduit l'implication de la communauté scientifique dans les problématiques de transition énergétique et environnementale.

Avec sa manière de construire des questions de physique sur, ou inspirées par, des objets qui appartiennent à d'autres champs, la matière molle est par essence une science très interdisciplinaire. Ainsi, on note une forte structuration de la communauté autour de plusieurs GDR, qui fédèrent des chercheurs d'horizons scientifiques divers. On note, par exemple, la création récente du GDR SoPhy, qui couvre un spectre de systèmes assez larges, des milieux biologiques aux matériaux industriels ; on souligne le dynamisme du GDR ISM (Interfacial Soft Matter) et de son rôle structurant pour la communauté française ; on note enfin la création du GDR PES (Plastiques, environnement, santé), qui traduit une fois de plus l'intérêt pour les questions environnementales. Les membres de la communauté sont par ailleurs très actifs dans l'organisation d'écoles

thématiques, qui permettent de partager les savoirs et de les transmettre aux jeunes chercheurs. Ainsi, des thématiques aussi diverses que l'acoustofluidique, les mouvements collectifs, les verres, les gouttes ou les mousses, les phénomènes de solidification, ou encore la RMN des polymères, ont fait l'objet d'écoles thématiques au cours des années passées. Enfin, le fait que nombre de ces sujets portent sur des objets macroscopiques, ou bien sont en lien avec des phénomènes du quotidien dont le grand public peut se saisir assez facilement, l'étude de la matière molle et des systèmes complexes se prête bien à la vulgarisation scientifique. La communauté est donc particulièrement motrice sur ce point et sur le plan national, *via* la publication d'ouvrages grand public recevant généralement un fort écho médiatique, et *via* l'organisation de conférences de vulgarisation dans divers événements locaux ou nationaux.

L'interdisciplinarité de la thématique « matière molle et systèmes complexes », tant par les systèmes étudiés que par les méthodes employées, la place de fait à cheval sur plusieurs sections et instituts du CNRS. Dans ce domaine, les interfaces de la section 05 avec les autres sections sont nombreuses et assez larges. Les aspects les plus physico-chimiques se traitent principalement en section 11, et l'interface avec cette section est particulièrement importante. Aux concours CRCN, on note ainsi un très grand nombre de candidatures communes entre ces deux sections. Les problématiques impliquant la mécanique du solide, des fluides, ou des milieux granulaires, sont également abordées en sections 9 et 10. Enfin, au sein même de la section 05, la séparation entre la thématique « matière molle et systèmes complexes » et les autres thématiques n'est pas marquée : par exemple, la physique des ondes en milieux complexes est une thématique transverse aux systèmes « durs » et « mous », qui sera détaillée dans la suite du rapport. Pour finir, certaines questions abordées en matière molle ou active ont une forte connexion avec la biophysique des cellules, des tissus ou des bactéries, qui est abordée dans la section suivante.

IV. Physique du vivant

La physique des systèmes biologiques est depuis quelques mandats une thématique en pleine expansion au sein de la section 05. Les physiciens se sont progressivement appropriés les objets biologiques comme systèmes d'étude à toutes les échelles, de la protéine aux organismes, du répertoire du système immunitaire aux comportements collectifs des micro-organismes ou des animaux. Ils sont maintenant en mesure d'identifier et d'aborder de nouvelles questions qui relèvent de la physique, et qui s'avèrent essentielles à la compréhension du vivant. Les sujets qui les animent se sont peu à peu étendus à tous les domaines des sciences de la vie : biologie structurale, immunologie, biologie cellulaire et du développement, oncologie, neurologie, microbiologie, etc. Malgré cette étendue thématique, l'approche réductionniste et le souci de quantifier les effets et de modéliser par des considérations théoriques, caractéristiques des physiciens et physiciennes de la section 05, constituent une marque de fabrique et assurent l'unité du domaine.

Les processus biologiques sont, par essence, des systèmes complexes hors d'équilibre qui résultent de l'interaction et la coordination spatiale et temporelle de leurs constituants. Une thématique importante au sein de la section est l'auto-organisation, ou comment une structuration ou une fonction émerge de l'organisation spontanée de protéines, de cellules, d'individus, etc. Ainsi, l'un des enjeux essentiels du domaine est l'établissement du lien entre les échelles. En effet, l'interaction entre protéines aux échelles nanométriques résulte des interactions à l'échelle sub-nanométrique et détermine les propriétés des assemblages moléculaires qui elles-mêmes gouvernent les propriétés des cellules (μm) et des tissus (jusqu'au mm). L'étude des effets collectifs (cytosquelette, cellulaires, tissulaires, embryogenèse, biofilms, organismes, plantes, etc.) est aussi primordiale pour comprendre nombre de questions biologiques et les outils de la physique statistique et de la mécanique

des fluides y sont particulièrement bien adaptés. En particulier, la prise en compte des effets intrinsèquement hors d'équilibre – ou actifs – dans les systèmes vivants, et la caractérisation de leur impact sur les propriétés de ces systèmes à différentes échelles constituent aujourd'hui un axe thématique important, qui regroupe une communauté croissante d'expérimentateurs et de théoriciens. Cette thématique de la physique de la matière active, si elle reste très souvent bio-inspirée, s'étend aujourd'hui au-delà des systèmes vivants, et comprend une variété croissante de systèmes biomimétiques ou artificiels (colloïdes actifs, robots, etc.). Les concepts physiques de morphogénèse et d'instabilités restent également très utiles pour comprendre diverses situations comme certains processus du développement embryonnaire ou de la formation de structures biominéralisées. L'accumulation massive de données qui résulte du développement des techniques de mesure des systèmes biologiques à haut débit nécessite le développement de nouveaux outils d'analyses basés sur des techniques d'inférence et d'intelligence artificielle pour lesquels les physiciens théoriciens sont particulièrement bien formés.

D'un point de vue expérimental, la révolution liée à la microfluidique et aux techniques de microfabrication a permis d'établir au long cours des thématiques autour de la mécano-transduction, qui étudie le lien entre mécanique cellulaire et signalisation, ou de l'interfaçage entre systèmes vivants et dispositif fluidique ou électronique. Dans les deux cas, l'objectif est de pouvoir appliquer et mesurer des signaux physiques (contraintes mécaniques, signaux électriques, etc.) *in situ* sur des systèmes biologiques de taille variée, des bactéries, cellules ou organismes avec une précision moléculaire, associées à des mesures méso- ou macroscopiques, de façon à établir le lien entre les échelles. Ces thématiques bénéficient aussi largement des nouveaux outils utilisant la lumière pour manipuler l'activité des protéines (optogénétique), mesurer des distances nanométriques ou des contraintes mécaniques (biosenseurs fluorescents). Les développements en microfabrication ont aussi permis l'essor des méthodes d'ingénierie tissulaire grâce à un

Comité national de la recherche scientifique

contrôle précis de l'environnement biochimique et mécanique et une large palette de techniques d'analyse allant de la microscopie de fluorescence à l'analyse des protéines exprimées à l'échelle de la cellule unique. Notons aussi une nouvelle voie dans l'ingénierie tissulaire qui vise à créer les conditions chimiques et mécaniques les plus proches de la situation *in vivo* pour la formation spontanée des structures d'intérêt sans en prédéfinir la géométrie. Toutes ces méthodes suscitent un vif intérêt étant donné l'ampleur et l'importance des applications médicales qu'elles ouvrent. Les physiciens y jouent un rôle majeur dans le domaine en collaboration étroite avec des biologistes.

La vitalité de cette communauté et son positionnement intrinsèquement interdisciplinaire est largement illustré par les différents GDR, associés aux différents instituts du CNRS, auxquels participent de nombreux chercheurs de la thématique « physique du vivant » de la section 05. Le GDR AQV (Approches quantitatives du vivant) a pris le relais du GDR CellTiss (Physique de la cellule au tissu) en 2021 avec une participation principale de CNRS Biologie. Ce GDR vise à consolider et à promouvoir les liens entre les communautés à l'interface entre la biologie et la physique, en prônant la nécessité d'un cadre interdisciplinaire. On trouve plusieurs GDR dont la thématique est plus resserrée et dans lesquels participent aussi des chercheurs de la section 05. On peut notamment citer ADN&G (Architecture et dynamique du noyau et des génomes), dédié à l'architecture et la dynamique du noyau cellulaire, et BIOCAMP (Implémentations matérielles du calcul naturel), centré sur la réalisation de matériaux bio-inspirés. PhyP (Biophysique et biomécanique des plantes) et MNF (Micro- et nanofluidique) sont quant à eux rattachés à CNRS Ingénierie. MECABIO Santé (Mécanique des matériaux et fluides biologiques pour la santé et le vivant) a pour but de fédérer les domaines de la mécanique des fluides et des matériaux biologiques et se retrouve entre CNRS Ingénierie et CNRS Biologie. Enfin, ImBio (Imagerie et microscopie en biologie) fédère des équipes de disciplines différentes autour des aspects liés à la microscopie du vivant.

De nombreux mots-clés de la section 05 résonnent avec la physique du vivant. Nous avons déjà parlé ici de physique des systèmes complexes, des relations structures-propriétés, des approches multi-échelles, des instabilités et de morphogénèse, de l'auto-organisation, des phénomènes hors équilibre et de la matière active. Mais la physique des systèmes biologiques a d'autres recouvrements avec les thématiques de la section 05. La synthèse et la compréhension des propriétés des nano-objets sont importantes pour le développement de sondes nanométriques fonctionnalisées et biocompatibles. L'utilisation des matériaux biologiques comme substrats et le développement de matériaux bio-inspirés pour des recherches en matière condensée sont en plein essor. Enfin, certaines activités de la matière molle (fluides complexes, matière active) se recoupent avec l'étude de la dynamique de systèmes biologiques que ce soit à l'échelle du cytosquelette, des cellules (bactéries, nageurs) ou, à plus grande échelle, sur des animaux ou des plantes.

On retrouve la thématique de la physique des systèmes biologiques en section 11, et la frontière entre les deux sur ces sujets n'est pas toujours bien définie même si l'approche y est toujours bien définie même si l'approche y est plus physico-chimique que physique. En ce qui concerne CNRS Ingénierie, il existe un rapprochement thématique sur les aspects biomécaniques et biofluidiques avec les sections 09 et 10, et avec la section 08 sur les enjeux de microsystèmes. Certaines recherches plus biologiques menées en section 05 peuvent se recouper avec celles de différentes sections de CNRS Biologie, notamment la 22 (biologie cellulaire et développement) en particulier pour les aspects de mécanobiologie. Enfin, deux commissions interdisciplinaires auxquelles contribue CNRS Physique, la CID 51 et la CID 54, cherchent à étendre encore plus largement l'interface avec le vivant. Dès le mandat précédent, l'opportunité de création d'une nouvelle section relevant de CNRS Physique et englobant la physique du vivant et peut-être la matière molle (ou complexe) a été discutée, elle reste d'actualité compte tenu de la diversité, et du fort développement tant fondamental qu'appliqué de ce domaine.

V. Axes transverses

A. Grands instruments et plateformes

Dans le domaine des grands instruments, la section 05 est particulièrement concernée par les études impliquant diffraction et diffusion de rayonnement, qu'il s'agisse de rayons X, de neutrons, ou de microscopie électronique. La situation dans ces différents domaines est brièvement décrite ci-dessous.

1. Synchrotrons et XFEL

La section 05 est historiquement très impliquée dans les très grandes infrastructures de recherche sur les thématiques précédemment citées. Les travaux de recherche menés au sein de la section s'appuient sur des techniques variées, basées principalement sur la diffraction, la diffusion et l'absorption des rayons, et des modalités de mesure dans l'espace direct ou l'espace de Fourier.

Les chercheurs de la section s'orientent naturellement vers SOLEIL, la source synchrotron française située à Saint-Aubin, et vers l'ESRF à Grenoble, mais sont aussi utilisateurs des installations européennes (Petra III, Alba, MAX IV, Elettra, Diamond, SLS, Bessy II, Eu-XFEL) et plus ponctuellement de celles hors de l'Europe (APS, NSLS II, Spring8, SLAC, SACLA). Les deux sources disponibles au niveau national, SOLEIL et l'ESRF, sont complémentaires de par la gamme d'énergie accessible : SOLEIL, sur une gamme allant de l'infrarouge aux X durs, et l'ESRF, sur la gamme X mous - X très durs. Des besoins expérimentaux spécifiques, les collaborations ou la nécessité d'assurer l'accès à du temps de faisceau sont les motivations principales qui conduisent la communauté à se tourner vers les sources internationales.

La période récente a été marquée par l'arrivée de synchrotrons de 4^e génération, comme

MAX IV en Suède et l'ESRF-EBS en France. Ces deux nouveaux synchrotrons sont aujourd'hui opérés en pleine performance et accessibles à la communauté française. Leurs sources sont capables de délivrer des faisceaux de brillance et de cohérence transverse accrues, offrant de nouvelles possibilités expérimentales en termes de résolution spatiale et temporelle. Même si pour certaines approches expérimentales ce changement de nature du faisceau nécessitera une adaptation sans gain direct associé, on peut citer deux axes bénéficiant particulièrement de cette avancée : les approches expérimentales fondées sur l'utilisation de la cohérence X (imagerie par diffraction inverse et spectroscopie de corrélation de photons X) et les méthodes nécessitant de hauts flux photoniques (nano-microscopie et études résolues en temps). Ainsi les études *in situ*, *in vivo*, *in operando* ou en conditions extrêmes bénéficient de ces avancées. Parmi les sujets émergents, on peut citer l'utilisation de faisceaux X avec un moment angulaire orbital, qui pourrait ouvrir de nouvelles perspectives en spectroscopie et les matériaux magnétiques.

Le synchrotron SOLEIL s'est engagé depuis plusieurs années dans la préparation de sa mise à niveau vers une source de 4^e génération (SOLEIL-II), en développant l'utilisation de la cohérence du faisceau X. La communauté d'utilisateurs a été associée à cette réflexion au cours de rencontres scientifiques organisées ces dernières années. Ce gain de brillance est également source de défis. En effet, l'intensité du faisceau produit souvent des dommages aux échantillons, dommages dont les manifestations et mécanismes ne sont pas encore totalement compris. Par ailleurs, la grande quantité de données générées nécessite le développement d'outils d'analyse et d'archivage, compatibles avec les politiques *open data*. On note enfin le développement de l'utilisation de l'IA, que ce soit au niveau de l'exploitation des lignes, de l'acquisition des données ou de leur analyse.

L'animation et la structuration de la communauté sont assurées par l'AFURS (Association française des utilisateurs du rayonnement synchrotron) et plusieurs GDR. Le GDR XFEL (Science autour des XFEL) œuvre à promouvoir

et soutenir les travaux de recherches sur les sources à électrons libres (programme GO2XFEL en particulier) et le GDR CohereX (Science with coherent X-rays at 3rd and 4th generation synchrotron sources) est centré sur l'utilisation de la cohérence X en synchrotron. Un grand nombre de chercheurs de la section 05 est impliqué dans les expériences menées sur synchrotrons et sur XFEL : ces implications peuvent aller du développement d'expériences et d'environnements spécifiques ou d'instruments et outils d'analyse uniques, jusqu'à l'accueil des utilisateurs sur ligne de lumière. Au-delà des groupes experts ou réguliers, ces infrastructures attirent aussi une communauté de nouveaux utilisateurs.

Enfin, les chercheurs affiliés à la section 05 sont très présents dans les différents comités d'attribution du temps de faisceaux des synchrotrons et leur conseil scientifique.

2. Diffusion neutronique

La diffusion neutronique a traditionnellement joué un rôle important au sein de la section 05, en raison de ses capacités uniques à révéler la structure et la dynamique de systèmes complexes, en particulier en matière molle et biophysique (variation de contraste) et en magnétisme. La fermeture de la source nationale Orphée, et l'engagement relativement marginal de la France dans la nouvelle source européenne ESS, laisse toutefois un doute quant au futur de ces activités au sein de la section. La communauté neutronique (représentée en particulier par la Fédération française de diffusion neutronique, qui implique de nombreux chercheurs de la section 05) s'est fortement mobilisée en faveur d'une nouvelle source nationale compacte HiCAN⁽¹⁾. Les arbitrages sur ce projet ne sont pas connus, et le calendrier qui implique 6 à 10 ans de délai avant d'en faire une structure ouverte aux utilisateurs pose la question du maintien du savoir-faire et de l'activité dans ce domaine qui reste essentiel pour de nombreuses applications, en biophysique comme en science des matériaux.

3. Microscopie électronique

Le monde de la microscopie électronique est actuellement marqué par plusieurs bouleversements majeurs, dus à des avancées technologiques importantes.

Tout d'abord, on peut mentionner l'arrivée des caméras dites à détection directe qui ont une sensibilité (l'électron unique) et une résolution temporelle (la nanoseconde) bien supérieures aux caméras CCD utilisées jusqu'à présent. Ces caméras permettent d'atteindre, avec des doses d'électrons très faibles, des images avec un rapport signal sur bruit bien supérieur à ceux obtenus précédemment. Cet aspect facilite grandement l'étude des systèmes très sensibles aux électrons, comme par exemple les échantillons biologiques, les molécules uniques ou de réaliser des « études *in situ* » (en milieu gazeux, liquide, etc.). La combinaison des caméras à détection directe pour la spectroscopie de pertes d'énergie (EELS) et les monochromateurs (résolution meilleure que 30 meV) ont ouvert tout un nouveau pan de recherche basé sur la corrélation des électrons incident avec les signaux générés, comme les rayons X ou la lumière visible, faisant du microscope un véritable laboratoire des interactions électron-matière. Les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle sont de plus en plus utilisés pour l'analyse des données, notamment celles de pychographie et de « 4D STEM », où chaque jeu de données contient une très grande quantité d'information. On note aussi depuis quelques années un regain grandissant pour le STEM-EDX. Des efforts récents pour améliorer la détection et la quantification des données chimiques obtenues en STEM-EDX ont remis cette technique sur le devant de la scène. Au travers du réseau METSA, ces avancées technologiques et ces nouvelles expertises sont accessibles pour toute la recherche française.

On observe également une augmentation du nombre d'utilisateurs du STEM (HAADF, EDX, Cryo) qui ne sont pas des experts en microscopie. Ceci est dû à une facilité d'utilisation accrue, aussi bien sur l'acquisition des données que sur leur interprétation en particulier pour le

STEM-HAADF ou le STEM-EDX. On observe également un rapprochement entre les études par microscopie électronique et par synchrotron, où l'amélioration de la résolution énergétique d'une part, et la cohérence d'autre part, permet d'obtenir deux jeux de données très complémentaires.

Ces avancées technologiques ont été possibles grâce à la levée de verrous technologiques, mais elles ont aussi complexifié et spécialisé les microscopes, qui deviennent de plus en plus des équipements fabriqués pour une application spécifique. Deux défis principaux sont alors à relever pour les laboratoires : être détenteur d'une expertise unique qui doit être préservée par des recrutements et des supports techniques durables, mais également trouver les ressources suffisantes pour faire face à l'augmentation du coût des contrats de maintenance de ces microscopes.

B. Développements numériques

Les activités de théorie et modélisation ont toujours occupé une place importante au sein de la section, que ce soit en matière molle, dans l'étude des nanostructures ou bien des matériaux massifs. Au cours des dix dernières années, on peut constater l'essor des méthodes numériques au sein de domaines de recherche qui étaient traditionnellement abordés en France sous l'angle d'approches analytiques, que ce soit des approches « Hamiltonien modèle » en matière condensée, ou bien à l'aide de lois d'échelles en matière molle. Ces développements bénéficient d'infrastructures aujourd'hui adaptées, avec en général un accès à des méso-centres locaux et à des infrastructures nationales (GENCI) suffisamment dimensionnées.

Il est courant de distinguer deux grandes classes d'approches numériques : d'une part les simulations atomistiques (dynamique moléculaire, de Langevin, Monte-Carlo, calculs *ab initio*) et d'autre part les modèles continus ou sur réseau (champ de phase, Lattice-Boltzmann, modèles élasto-plastiques). Les

simulations atomistiques proposent une description des degrés de liberté nucléaires (dynamique moléculaire) ou électroniques (*ab initio* reposant sur l'équation de Kohn-Sham, TDDFT pour décrire l'interaction lumière-matière). D'un autre côté, les modèles continus reposent sur une description le plus souvent phénoménologique du système à l'aide de champs, qui peuvent représenter l'évolution spatiale d'un paramètre d'ordre, du champ de vitesse hydrodynamique d'un fluide ou de l'état de déformation d'un solide. La distinction entre les deux grandes classes d'approches n'est toutefois pas si tranchée, et certaines méthodes mésoscopiques peuvent être couplées à des approches plus microscopiques. Le graal de la communauté est de bâtir une méthodologie multi-échelle capable de connecter les échelles microscopiques aux échelles macroscopiques de temps de d'espace. Si cette démarche est déjà largement répandue dans le domaine des échelles d'espace, elle reste un défi dans le domaine des échelles de temps. Dans cette perspective, un verrou à lever concerne la modélisation multi-échelle du franchissement de barrières d'énergie, qui sont typiques d'événements rares que l'on rencontre dans plusieurs contextes en matière condensée (nucléation, système vitreux, diffusion d'impuretés dans les solides).

Une activité dont il est difficile d'ignorer l'essor concerne les approches d'intelligence artificielle de type *machine learning* (ML). Bien entendu, ces approches ne sont pas circonscrites à la simulation et sont également largement employées par les expérimentateurs afin d'analyser systématiquement une grande quantité de données brutes. En science des matériaux, l'engouement pour les méthodes ML peut s'expliquer par la possibilité de prédire de manière systématique les propriétés des matériaux avec un coût relativement réduit. Les techniques de *reverse engineering* offrent la promesse d'identifier les matériaux les plus prometteurs présentant un ensemble de caractéristiques désirées. Une autre activité qui a pris de l'ampleur concerne le développement de potentiels interatomiques ML construits à partir de noyaux ou à l'aide de réseaux de neurones.

Le principe repose sur une analyse de trajectoires réalisées à l'aide de calculs de dynamique moléculaire *ab initio*. Cette activité a atteint son niveau de maturité, et après la modélisation de systèmes massifs, une tendance actuelle en matière condensée est de décrire des interfaces, aussi bien solide-liquide que solide-solide. Au-delà de la science des matériaux, en physique statistique, les chercheurs de la section s'impliquent dans la description des transitions de phase (cristallisation, formation d'interphases) à l'aide d'un formalisme de variables collectives. En matière molle, les approches d'inférence bayésienne permettent de retrouver les forces d'interaction entre objets browniens à partir de l'observation de leur trajectoire. Il existe, pour finir, certainement un vaste champ d'opportunités en matière molle, que ce soit pour la description de l'autoassemblage de systèmes colloïdaux ou bien afin d'identifier des précurseurs au sein de systèmes présentant des dynamiques lentes ou hors d'équilibre. Les chercheurs de la section sont bien placés pour aborder ces défis.

Plusieurs autres problèmes notoires en matière condensée continuent de concentrer les efforts de développement des chercheurs. Mentionnons les méthodes de Green (GW) et Bethe-Salpether, éventuellement environnés, nécessaires à la modélisation de nanostructures et des matériaux pour le photovoltaïque et plus largement pour la description des excitons. Au-delà de l'approximation de Born-Oppenheimer, le traitement quantique des noyaux est un domaine en développement dans lequel la France est bien positionnée. Ces effets quantiques nucléaires sont importants pour décrire les transitions de phase et la supraconductivité de systèmes d'hydrures, mais également le transport thermique de matériaux légers. La modélisation en science des matériaux ne repose pas uniquement sur des approches *ab initio*, et la méthode du champ de phase, originellement développée pour décrire la croissance dendritique, est très efficace pour modéliser les phénomènes d'alliage de systèmes métalliques.

En physique des systèmes amorphes, on peut mentionner les progrès récents réalisés

dans le développement d'algorithmes Monte-Carlo capables de préparer des systèmes relaxés de manière très efficace. L'enjeu pour les années à venir est d'adapter ces méthodes à la description de systèmes vitreux réalistes. Un domaine connexe également très actif concerne la modélisation de la déformation des matériaux amorphes. Ici aussi, le défi consiste à construire des modèles aptes à représenter des systèmes réalistes déformés dans des conditions proches des expériences.

Pour finir, les chercheurs de la section sont fortement impliqués dans le développement de codes de simulations *ab initio*, en particulier quantum ESPRESSO, ABINIT et FIESTA. L'animation de la communauté se fait à travers le réseau Modmat et les GDR IAMAT, REST, NaME pour n'en citer que quelques-uns. Les chercheurs de la section ont également activement participé au travail de perspective de CNRS Physique au sein de l'axe « enjeux numériques ». Enfin, l'intelligence artificielle pour le design des matériaux est l'un des piliers du PEPR DIADEM avec l'ambition de mettre au service de la communauté un ensemble de logiciels.

C. Ondes en milieux complexes

Cette thématique dépasse clairement les limites d'une section CNRS et la communauté correspondante se retrouve au sein du GDR COMPLEXE (Contrôle des ondes en milieu complexe), qui associe plusieurs sections et instituts et dans lequel, les chercheurs de la section jouent un rôle important. Au sein de la section 05, on note un intérêt maintenu pour la compréhension des phénomènes de localisation dans les milieux désordonnés, pour des ondes et des désordres de natures variées. Un autre axe en fort développement est le contrôle et l'imagerie dans des milieux diffusants et biologiques. La conception et la compréhension de nouveaux métamatériaux, en lien avec les développements en matière condensée, est également un thème d'actualité.

VI. Sobriété énergétique

Les défis environnementaux et énergétiques nécessitent d'enclencher un changement des pratiques et des usages de la recherche, ainsi que de son évaluation. C'est une responsabilité éthique des chercheurs et des instances d'évaluation soulignée dans le rapport du Comité éthique de la recherche (COMETS) « Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche – Une responsabilité éthique » (avis n° 2022-43), approuvé le 5 décembre 2022. En tant qu'instance d'évaluation, il est aussi de la responsabilité de la section 05 d'accompagner le personnel de la recherche dans cette transition.

On observe un intérêt accru de la communauté scientifique pour les questions de sobriété énergétique, à travers le choix de projets de recherche visant à offrir des solutions technologiques à la crise environnementale, ou à travers l'engagement dans des tâches d'intérêt collectif allant dans le sens d'une meilleure gestion des ressources (aide au calcul du bilan carbone de l'unité, rôle de correspondant éco-responsable, aide à la restructuration de la recherche, lancement d'une réflexion collective sur l'impact des enjeux environnementaux sur les recherches menées dans l'unité, etc.).

Au début du mandat, la section 05 a par ailleurs mis à jour ses critères d'évaluation pour y inclure une dimension qualitative plutôt que quantitative : cette évolution vise à encourager une utilisation réfléchie des ressources énergétiques et matérielles nécessaire pour mener à bien un travail de recherche dans un contexte international.

À l'instar d'autres thématiques, la section 05 s'engage dans l'accompagnement des chercheurs souhaitant faire évoluer leurs recherches vers des sujets reliés à la transition écologique. À cette fin, la section tient compte, comme pour toute réorientation, des possibles retards de publication ou diminution temporaire de la visibilité internationale.

VII. Parité

La section 05 est attentive aux aspects de parité et d'égalité femmes-hommes dans son travail d'évaluation de la recherche, en particulier au moment des concours d'entrée dans les corps de CR et de DR.

Le recrutement CR en section 05 est un concours difficile, avec une forte pression au niveau des candidatures : lors des concours 2022 et 2023, entre 70 et 90 jeunes chercheurs et chercheuses se sont présentés pour 5 postes ouverts. La proportion de candidates est de 23 % en moyenne, alors que la proportion de lauréates est de 40 % (ce dernier chiffre étant toutefois soumis à de fortes fluctuations compte tenu des petits nombres de lauréats).

Pour le concours DR, il y a chaque année environ 25 candidates et candidats, avec une moyenne de 21 % de femmes. La proportion de femmes lauréates est de 38 %. La proportion de candidates est inférieure à la proportion de femmes CR (31 %) et, dans une moindre mesure, à la proportion de femmes CR titulaires de l'habilitation à diriger des recherches (24 %).

Note

(1) High Current Accelerator-driven Neutron Source.

