

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.

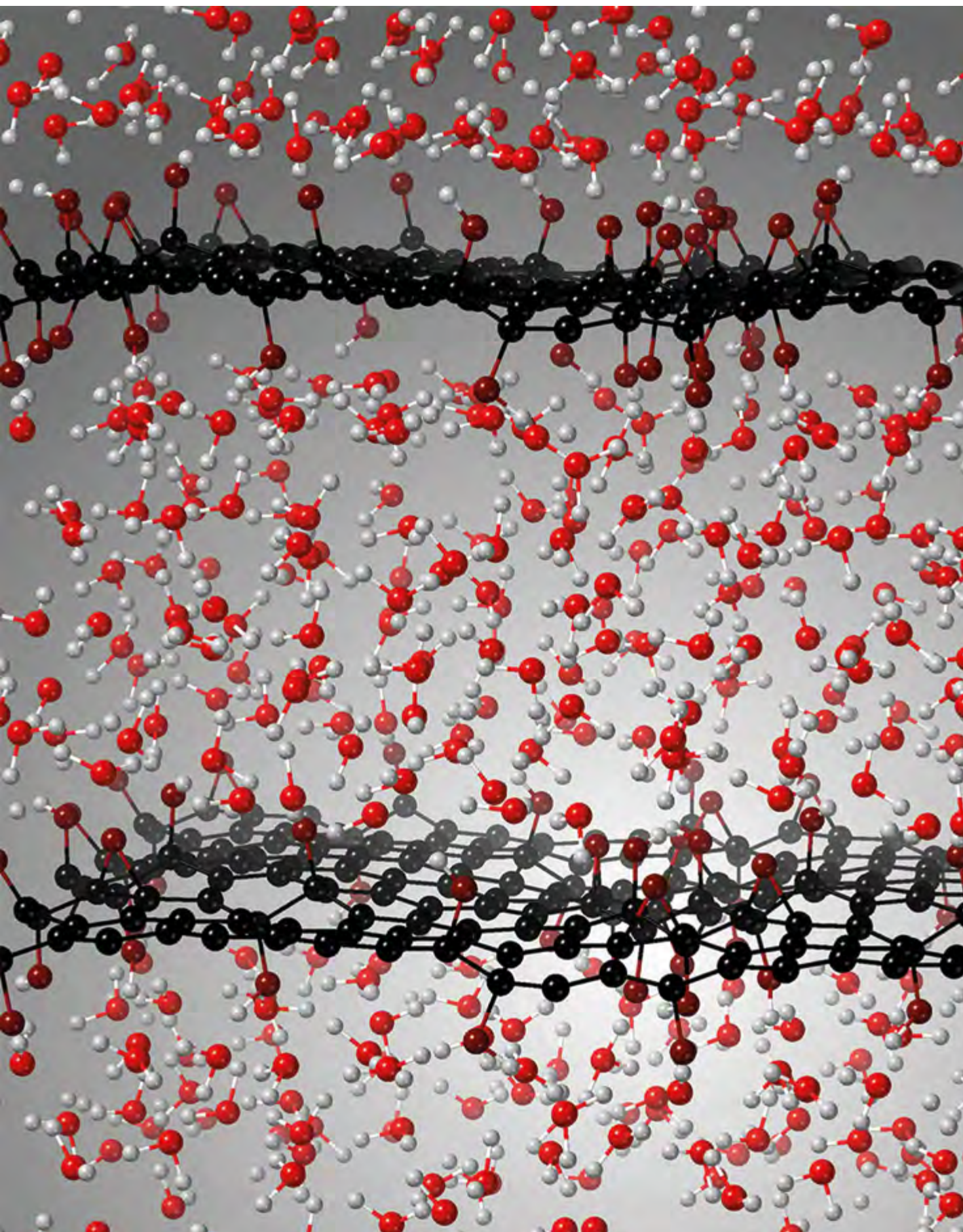
Atteindre les échelles moléculaires, voire atomiques, nécessite de prendre en compte, de façon très nouvelle dans ces problématiques hors équilibre, la chimie et *in fine* les effets quantiques. Ainsi, il a été montré récemment que la friction et l'écoulement d'un liquide sont, pour un système particulier, 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/SPÉCIFICITÉ : 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-CHIMIE 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 MOLÉCULAIRE

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.