

Rapport de conjoncture 2024

Section 11

MATIERE MOLLE : SYNTHESE, ELABORATION, ASSEMBLAGES, STRUCTURE, PROPRIETES, FONCTIONS

Composition de la section

Daniel GRANDE (président), Elise DENIAU (secrétaire scientifique), Sophie GUILLAUME (membre du bureau), Laurence RAMOS (membre du bureau), Arnaud SAINT-JALMES (membre du bureau), Carole AIME, Karine ANSELME, Olivier BOYRON, François DETCHEVERRY, Ralf EVERAERS, Guillaume FLEITH, Philippe GUEGAN, Catherine LADAVIERE, Christian LIGOURE, Alba MARCELLAN, Anne-Françoise MINGOTAUD, Guillaume MIQUELARD-GARNIER, Emilie MOULIN, Nadine NASSIF, Frederick NIEPCERON, Frédéric RESTAGNO.

Résumé

Le périmètre scientifique de la section 11 couvre tout le spectre des recherches sur la matière molle, de la chimie à la physique avec une place centrale aux aspects physico-chimiques et des interfaces fortes avec la biologie et l'ingénierie. Ce continuum disciplinaire est associé à la complexité des objets, systèmes et matériaux étudiés et une grande diversité thématique qui met en synergie des approches expérimentales et théoriques différentes mais complémentaires. À travers trois grands domaines thématiques de la section 11, ce rapport de conjoncture illustre l'interdisciplinarité et la transversalité de la matière molle. La répartition des Unités et des chercheur·e·s rattaché·e·s à la section 11 est abordée dans une deuxième partie. Est ensuite discutée la contribution de la matière molle aux enjeux sociétaux et environnementaux, tout en permettant le progrès des connaissances au service de la société. La quatrième partie traite de l'évolution des grandes thématiques sur l'ensemble du spectre disciplinaire de la section 11. Enfin, la dernière partie résume ses forces et ses opportunités, notamment à la frontière avec d'autres champs disciplinaires comme les sciences du numérique ou du vivant.

Introduction

Doublement rattachée aux Instituts CNRS Chimie à titre principal et CNRS Physique à titre secondaire, avec des interfaces fortes avec les Instituts CNRS Ingénierie et CNRS Biologie, la section 11 du Comité National de la Recherche Scientifique fédère une large communauté scientifique regroupant chimistes de synthèse de systèmes supra- et macromoléculaires, expert·e·s des matériaux polymères et composites, physico-chimistes et physicien·ne·s de la matière molle et des systèmes biologiques. Ce large spectre de compétences complémentaires constitue une force indéniable et une richesse unique, source de synergies remarquables visant à répondre à la fois à des problématiques fondamentales et aux grands défis sociétaux et environnementaux dans les domaines du développement durable, de l'environnement, de la santé, de l'information, de l'énergie et des transports.

Les chercheur·e·s, enseignant·e·s-chercheur·e·s, ingénieur·e·s et technicien·ne·s impliqué·e·s dans cette communauté pluridisciplinaire œuvrent au développement et à la compréhension des objets de la matière molle (polymères, molécules auto-assemblées, colloïdes, tensioactifs, cristaux liquides, ...) en couvrant l'ensemble du continuum de leur conception et synthèse à leur élaboration et à l'étude théorique et expérimentale reliant leur structure à leurs propriétés fonctionnelles. En intégrant de multiples fonctionnalités (bio)organiques ou inorganiques de cœur ou de surface, ces objets sont de plus en plus complexes tout en étant mieux définis en termes de dimensions moléculaires, compositions chimiques et architectures, ce qui ouvre la voie à des assemblages supra- et macromoléculaires ainsi que des matériaux organiques ou composites originaux multi-échelles aux propriétés innovantes, réversibles et/ou stimulables, selon une approche « bottom-up ».

Compte tenu des objets, systèmes et matériaux étudiés, une des spécificités de la science de la matière molle est son positionnement original à l'interface des recherches fondamentales et celles à finalité appliquée, une question scientifique pouvant souvent répondre à une problématique industrielle et une application concrète alimentant ou revisitant une question fondamentale.

Ce rapport de conjoncture s'adresse non seulement à la communauté scientifique mais également aux directions des Instituts de rattachement et à la direction générale du CNRS. Les membres de la section 11 ont délibérément choisi de le structurer de manière singulière afin de mettre en exergue son interdisciplinarité inhérente à la matière molle avec le continuum chimie – physico-chimie – physique et ses interfaces fortes avec l'ingénierie et la biologie. La première partie aborde certains des grands domaines thématiques de la section 11 avec trois exemples illustrant un type de systèmes, les polymères, un type d'environnement, les interfaces, et un type de processus, les assemblages. La deuxième partie résume les données institutionnelles sur les Unités et les chercheur·e·s rattaché·e·s à la section 11, notamment leur répartition géographique. La troisième partie est dévolue à la contribution de la matière molle aux enjeux sociétaux et environnementaux tout en permettant l'avancée du front des connaissances fondamentales. La quatrième partie est consacrée à l'évolution des thématiques constituant le périmètre scientifique de la section 11, en distinguant les champs émergents ou en plein essor de ceux orphelins ou en retrait. Enfin, la dernière partie conclut sur les forces et les opportunités de la section 11 pour maintenir voire élargir sa diversité thématique et consolider sa forte dynamique.

I. Les grands domaines thématiques de la section 11

A l'interface de la chimie, la physique, l'ingénierie et la biologie, la diversité thématique de la section 11 est illustrée ci-dessous à travers deux nuages de mots générés à partir d'une analyse bibliographique des articles publiés par les chercheur·e·s y étant rattaché·e·s sur la période 2019-2023 (4850 articles).



D'une part, le nuage à gauche reflète le nombre d'occurrences des 50 mots les plus utilisés dans les titres des articles, des journaux et dans les résumés correspondants. D'autre part, le nuage à droite montre les 27 journaux les plus représentés de ces mêmes publications, représentant environ 34 % de celles-ci. Ce pourcentage montre la très grande diversité des revues scientifiques de la communauté de la section 11.

Afin de mettre en exergue son interdisciplinarité et la continuité entre les disciplines, sont présentés ci-après trois exemples caractéristiques de mots-clés qui traversent le spectre des thématiques de la matière molle de la chimie à la physique *via* la physico-chimie et les interfaces avec la biologie ainsi que la science et l'ingénierie des matériaux. Ces exemples ont été choisis pour montrer que cette transversalité peut se décliner autant en termes de systèmes d'étude (les polymères), d'échelles de taille caractéristiques (les interfaces) que de mécanismes physico-chimiques (les assemblages).

a. Polymères

Dans le contexte général d'appauvrissement des ressources fossiles à partir desquelles de nombreux polymères actuels sont produits, il s'agit désormais de concevoir les matériaux polymères du futur selon une approche globale, plus durable, respectueuse de l'environnement et de la société. Ainsi, les méthodes de synthèse des polymères fonctionnels par polymérisations en chaîne ou par étapes sont repensées, et des polymères issus de ressources renouvelables non-comestibles sont désormais conçus selon des procédés s'inscrivant dans le cadre d'une chimie verte (réactifs non toxiques, absence de solvant, économie d'atome, réaction peu énergivore, synthèse en milieu CO₂

supercritique ou par extrusion réactive, ...). La conception de polymères biosourcés à partir de bioressources (synthons biosourcés), par modification chimique de polymères naturels tels que les polysaccharides ou par valorisation de biodéchets (par exemple, huiles végétales) est reconsidérée. L'insertion d'unités de reconnaissance moléculaire au sein des structures polymères afin d'induire leur auto-assemblage en matériaux hiérarchisés stimulables est également considérée afin de contrôler leurs propriétés et leur cycle de vie. L'insertion dans le squelette des macromolécules d'entités sensibles à un stimulus permet, par ailleurs, d'envisager le recyclage du polymère et/ou sa dégradation. En particulier, les travaux entrepris récemment s'orientent vers la dégradation des polymères selon trois voies : (1) en sous-produits de plus faible valeur ajoutée (sous-cyclage ou « down-cycling »), (2) en produits à haute valeur ajoutée réutilisables dans un autre processus (surcyclage ou « up-cycling »), ou (3) en leur monomère initial (dépolymérisation), dans des procédés dits à cycle de vie ouvert ou fermé. La catalyse joue un rôle déterminant dans ces processus, qu'elle soit enzymatique, organique ou (organo)métallique.

Plusieurs évolutions importantes sont apparues ces dernières années en rhéologie des polymères. Elles comprennent (i) la caractérisation détaillée de polymères complexes à structure contrôlée, (ii) l'analyse de mélanges, (iii) des tests supplémentaires des limites des modèles tubulaires actuels dans les écoulements non linéaires en combinant les prédictions, les expériences et les simulations, (iv) l'amélioration de modèles ou éventuellement la recherche de cadres alternatifs pour la rhéologie non linéaire, (v) l'exploration des limites de l'expérimentation en cisaillement, extension uniaxiale ou biaxiale pour atteindre des taux et des déformations plus élevés et explorer des phénomènes encore mal compris, (vi) l'étude détaillée de l'origine des régimes transitoires et des non-linéarités en régime permanent dues à un couplage entre écoulement et conformation.

b. Interfaces

L'interface –en tant que frontière entre deux milieux qu'ils soient gazeux, liquides ou solides– est un objet d'étude transverse en matière molle. Ainsi, autour des interfaces se développent des concepts et outils génériques et fédérateurs qui irriguent toutes les thématiques de la section 11. Un point important est qu'il existe des phénomènes physico-chimiques spécifiques et localisés aux interfaces et que ceux-ci peuvent piloter le comportement volumique du système. Pour les matériaux dispersés (mousses, émulsions), on cherche ainsi à comprendre comment la formulation chimique (tensioactifs, polymères, ...) gouverne les propriétés structurales et dynamiques des interfaces liquides et comment celles-ci contrôlent les propriétés finales du matériau. De même, pour les matériaux poreux qui ont des surfaces spécifiques élevées, les mécanismes physico-chimiques aux interfaces jouent un rôle important ; la compréhension de ces mécanismes permettant ensuite la conception de nouveaux matériaux ou membranes. Ces effets propres aux interfaces sont aussi majeurs dans les problématiques de mouillage, d'adhésion ou de séchage et s'associent souvent à des effets géométriques et de confinements non triviaux. Les cellules et tissus biologiques sont des systèmes compartimentés pour lesquels se posent aussi les mêmes questions génériques liées aux interfaces, que ce soit entre les cellules ou au sein de ces dernières : l'intérêt récent pour le phénomène de séparation liquide-liquide dans les cellules en est une bonne illustration. Enfin, l'importance des interfaces croît aussi en chimie de synthèse, notamment pour le développement de nouvelles méthodes en milieux dispersés, ce qui

contribue à enrichir les connaissances communes sur les interfaces établies par les différentes communautés de la section 11.

c. Assemblages

L'auto-organisation –assemblage spontané d'éléments discrets en structures organisées– est une thématique transverse qui sous-tend de nombreuses recherches en matière molle et particulièrement dans les différents domaines couverts par la section 11. A l'interface entre chimie, physique, ingénierie des matériaux ou biologie, cette thématique recouvre à la fois les interrogations les plus fondamentales comme le fonctionnement du vivant et des innovations de rupture comme les nanotechnologies.

Les processus d'auto-organisation sont impliqués dans un nombre impressionnant de systèmes hiérarchiques aussi bien naturels qu'artificiels. Une meilleure compréhension des interactions mises en jeu au niveau moléculaire a permis de mieux appréhender la formation de systèmes complexes aux échelles supérieures. L'auto-organisation de molécules ou de polymères impliquant des processus de reconnaissance supramoléculaire conduit, par exemple, à des matériaux aux propriétés originales. Ainsi, dans le domaine de l'électronique organique, les processus d'auto-assemblage permettent l'accès à des systèmes organisés à grande échelle, dont les propriétés rivalisent, entre autres, avec leurs analogues inorganiques. Par ailleurs, l'utilisation de la dynamique des liaisons covalentes a donné lieu au développement d'une nouvelle classe de matériaux polymères, les vitrimères, dont les propriétés répondent aux enjeux environnementaux de durabilité et de recyclabilité. L'auto-assemblage de polymères –en multicouches, solution ou fondu- et de colloïdes fonctionnalisés, par exemple avec des brins d'ADN spécifiques, demeure également une voie très étudiée pour la création de nano- et microstructures, capables de répliquer certaines propriétés du vivant (biomimétisme) ou présentant un potentiel pour des applications en lithographie. Enfin, dans la matière vivante, le système auto-organisé par excellence, il s'agit d'élucider le lien entre le comportement des cellules individuelles et les propriétés des populations et tissus.

Malgré leur grande diversité, les phénomènes d'auto-organisation posent une question générique : comment les caractéristiques des éléments discrets et leurs interactions déterminent-elles la structure auto-assemblée ? Dans les applications, cette question se double d'une interrogation plus pratique : quel choix optimal des éléments permet d'aboutir le plus efficacement aux structures désirées ? Enfin, l'assemblage guidé –par un champ extérieur, des processus hors-équilibre ou des protocoles adaptés– est un riche terrain d'exploration. Souvent menées de concert avec les expériences, les techniques de simulation sont un outil puissant nécessaire à la compréhension et à l'optimisation des systèmes auto-organisés.

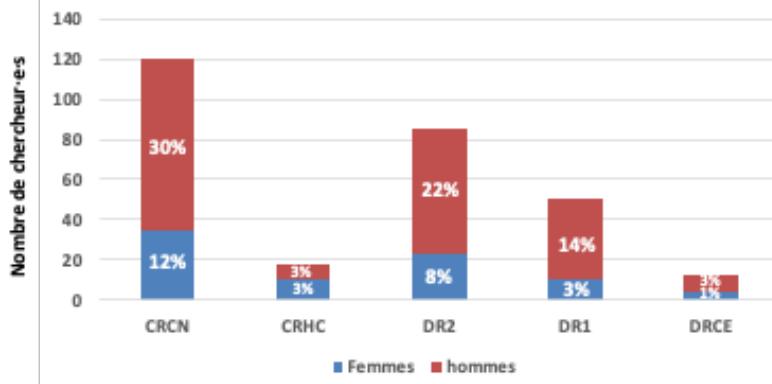
II. Répartition des Unités et des chercheur·e·s de la section 11

87 structures opérationnelles de recherche relèvent des thématiques de la section 11, dont 67 unités mixtes de recherche (UMR), 2 unités propres de recherche (UPR), 5 unités associées de recherche (UAR), 1 *International Research Laboratory* (IRL), 1 équipe mixte de recherche (EMR) et 11 fédérations de recherche (FR). Parmi ces structures de recherche, 24 d'entre elles sont rattachées à la section 11 en tant que section principale : 17 UMR, 2 UPR, 2 UAR, 1 IRL, 1 FR et 1 EMR, l'institut principal de rattachement étant CNRS Physique pour 2 UMR et CNRS Chimie pour toutes les autres structures.

Les sections 05, 12, 13, 14, 15 et 16 sont les sections principales et/ou secondaires de rattachement les plus communes, suivies des sections 03, 04, 09, 10, 20 et 28, ce qui illustre la diversité thématique en lien direct avec la section 11. Son interdisciplinarité s'illustre également par la variété des instituts principaux de rattachement des Unités concernées par la section 11 à titre secondaire : CNRS Chimie (27 UMR, 2 UAR, 7 FR), CNRS Physique (12 UMR, 1 FR), CNRS Ingénierie (8 UMR, 2 FR) et CNRS Biologie (1 UMR, 1 UAR).

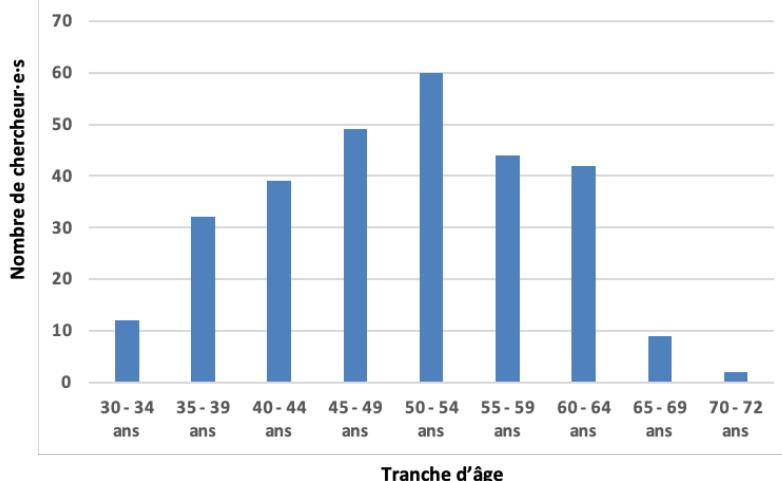
287 chercheur·e·s sont rattaché·e·s à la section 11 dont 26 qui s'intéressent à l'interface avec la biologie sont co-rattaché·e·s à la CID 54 « Phénomènes fondamentaux et propriétés collectives du vivant: développements instrumentaux, expériences et modèles physiques ». Les chercheur·e·s de la section 11 ont une moyenne d'âge de 50 ans et 25% sont étrangers. La répartition par genre (28 % de femmes et 72 % d'hommes) évolue lentement : on observe une progression de 3 % du nombre de femmes depuis 2012. Les chargé·e·s de recherche représentent 48 % de l'ensemble des chercheur·e·s alors que 52 % sont directeur·rice·s de recherche. Il convient de noter que la répartition sur le territoire est inhomogène puisque 4 grands sites regroupent presque les trois-quarts des chercheur·e·s de la section 11, en corrélation avec le nombre d'Unités rattachées à la section : Paris/Ile-de-France (33 %), Lyon (15 %), Bordeaux (13 %) et Strasbourg (12 %). Davantage de précisions sur les Unités et les chercheur·e·s de la section 11 sont disponibles sur le site internet dédié : <https://section11.wixsite.com/section11-conrs>

Répartition des chercheur·e·s de la section 11 par genre et par grade

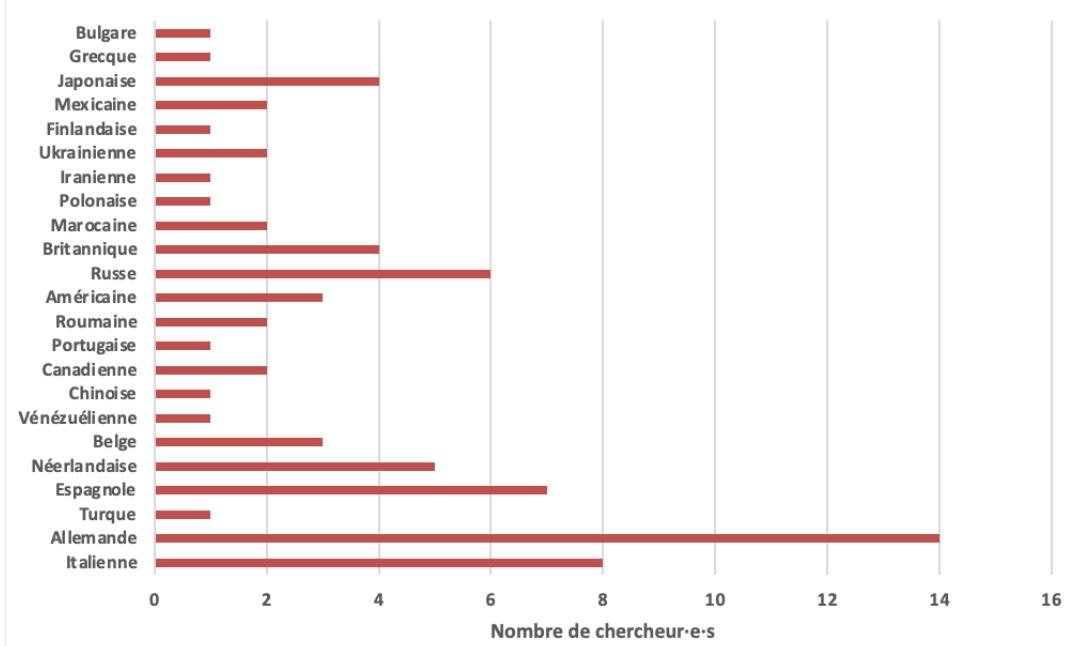


Le pourcentage affiché est calculé sur le total des chercheurs

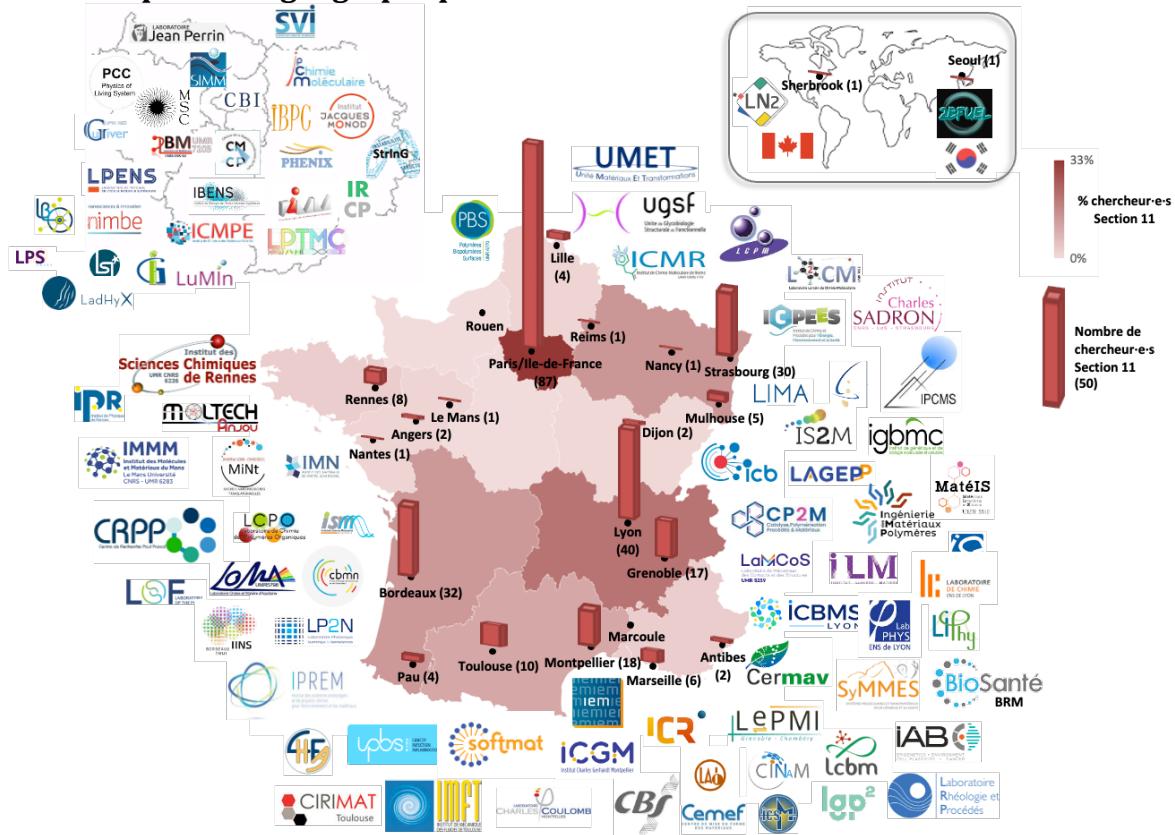
Pyramide des âges des chercheur·e·s de la section 11



Nationalité des chercheur·e·s étranger·ère·s de la section 11

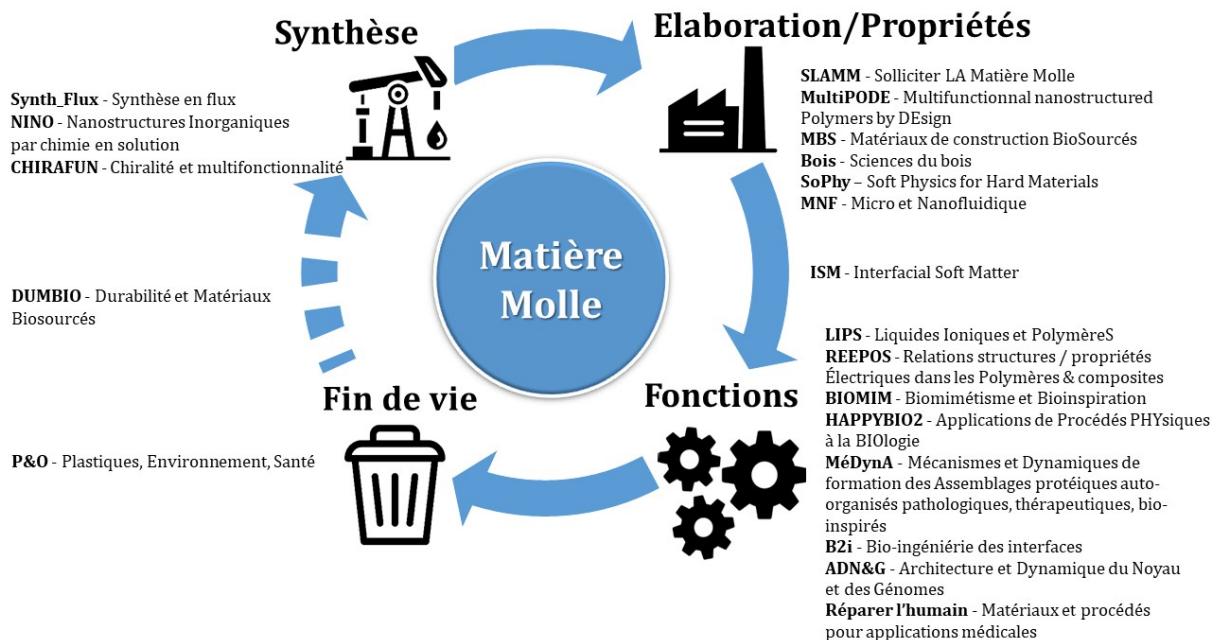


Répartition géographique des Unités et des chercheur·e·s de la section 11



La vitalité des recherches sur la matière molle est également illustrée par le nombre élevé de GDR (20) dans lesquels sont impliqués les Unités et les chercheur·e·s de la section 11, de la synthèse d'objets, systèmes et matériaux à leur élaboration et à l'étude de leurs propriétés structurales et fonctionnelles tout en tenant compte des aspects de durabilité et de cycle de vie.

GDR impliquant des Unités et des chercheur·e·s de la section 11



Au sein du volet « dirigé » de France 2030, dit « financement des investissements stratégiques », une action est dédiée au financement de la recherche la plus fondamentale (TRL 1 à 4) : les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR). Ces nouveaux programmes fédérateurs et structurants, fortement dotés financièrement, se déclinent selon deux types : les PEPR adossés aux stratégies nationales d'accélération, afin d'accompagner une transformation déjà engagée, et les PEPR exploratoires, afin d'accompagner une transformation qui commence à émerger. La communauté de la matière molle est particulièrement concernée par 4 PEPR exploratoires et 5 PEPR d'accélération listés ci-dessous.

PEPR impliquant des Unités et de chercheur·e·s de la section 11

Exploratoires	Stratégies nationales d'accélération
<ul style="list-style-type: none"> Matériaux émergents : <i>dispositifs intégrés pour l'accélération du déploiement de matériaux émergents</i> (DIADEM) Stockage moléculaire de données (MoleculArXiv) Lumière-Matière (LUMA) Robotique Organique (O2R) 	<ul style="list-style-type: none"> Recyclage : <i>technologies avancées & analyses socio-économiques pour la transition écologique dans le recyclage</i> Batteries : <i>soutenir l'innovation pour développer les futures générations de batteries</i> Décarbonation de l'industrie (SPLEEN) : <i>soutenir l'innovation pour développer de nouveaux procédés industriels largement décarbonés</i> Systèmes énergétiques (TASE) : <i>technologies avancées des systèmes énergétiques</i> Hydrogène décarboné (H2)

III. Contribution de la matière molle aux enjeux sociétaux et environnementaux

a. Contribution à l'avancée des connaissances fondamentales

Outre les fortes implications de la section 11 dans les activités de valorisation et de recherche partenariale, une contribution essentielle de la matière molle aux enjeux sociétaux et environnementaux est l'avancée du front des connaissances. En effet, affichée comme la priorité du CNRS, inscrite dans une temporalité longue, l'avancée des connaissances est un socle incontournable au service de notre société.

b. Environnement et société durable

Au-delà de la pollution généralisée associée aux plastiques, le contexte socio-économique et environnemental nécessite de repenser la matière molle dans une perspective plus vertueuse, en intégrant ses impacts à chaque étape du cycle de vie sans négliger les aspects de toxicité. Ainsi, les volets synthèse, élaboration et fonction sont abondamment étudiés et fédèrent la communauté. L'intégration du biosourçage a permis de générer de nouvelles opportunités dans les structures et fonctions de la matière molle. La fin de vie et la recyclabilité des matériaux, trop longtemps ignorées, sont aujourd'hui intégrées aux nouvelles recherches. Une démarche d'éco-conception, en développant par exemple des matériaux susceptibles de se biodégrader dans des environnements variés, est devenue un enjeu central. Outre les approches mécaniques de recyclage, une approche chimique est en développement, comme l'intégration de fonctions ester dans les polyoléfines ou le polystyrène, et permettent d'envisager le surcyclage et/ou une dégradation facilitée de ces polymères de commodité. Ces deux approches ne doivent pas être exclusives. Dans un contexte de quantification des impacts environnementaux *via* la méthode d'analyse du cycle de vie, la section 11 a tout son rôle à jouer pour alimenter les méthodes et hypothèses de calcul.

c. Energie

L'un des objectifs affichés notamment par l'Union Européenne est de réduire ses émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990 et d'atteindre la neutralité climatique en 2050. Dans cette optique, la recherche dans le domaine de la matière molle est pertinente. Les chercheur·e·s de la section 11 contribuent à certains développements de systèmes de stockage d'énergie plus efficaces, comme les batteries et les supercondensateurs. La recherche de matériaux souples potentiellement moins coûteux et plus polyvalents que les matériaux inorganiques traditionnels, a un rôle important à jouer dans l'électronique organique, le photovoltaïque ou la thermoélectricité. Un autre exemple concerne les travaux sur les matériaux de construction : compréhension de la physique des ciments en vue de la fabrication de matériaux moins énergivores, ou optimisation des procédés de fabrication des isolants pour le bâtiment. Un autre enjeu présent dans la section 11 est la question du stockage de carbone, élément nécessaire d'après le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Plusieurs directions sont étudiées dont le stockage dans les sols *via* l'utilisation de biofilms par exemple. A ces thématiques se greffe l'importance accrue de la prise en compte de la fin de vie, par exemple la réutilisation ou le recyclage des déchets issus des équipements électriques et

électroniques (DEEE), des éoliennes ou des panneaux solaires, sujets sur lesquels la recherche est encore balbutiante. Enfin, notons le rôle particulier de la France dans la recherche sur l'énergie bleue qui présente un risque fort mais des potentialités extrêmement importantes.

d. Santé

La conception de systèmes supramoléculaires interagissant avec les systèmes vivants et l'étude des systèmes biologiques, de la cellule au tissu, font partie intégrante de la matière molle. Ces recherches, développées largement par les membres de la section 11, apportent une contribution significative aux enjeux sociaux dans le domaine de la santé. La nanomédecine est une force vive de la section 11 en particulier pour la formulation et la vectorisation de principes actifs par des systèmes tels que des assemblages, qui peuvent être sensibles à un *stimulus* extérieur spécifique. Une autre contribution notable concerne la conception de biomatériaux, notamment pour des applications en ingénierie tissulaire selon des approches bioinspirées ou biomimétiques (composition, structure et/ou propriétés). La compréhension des processus physico-chimiques impliqués dans la formation des tissus biologiques (morphogenèse) à différentes échelles demeure une activité relevant de la section 11 ainsi que ceux impliqués dans des conditions de physiopathologie. Les approches biophysiques de la motilité cellulaire collective et tridimensionnelle, ainsi que la croissance de tissus cancéreux, constituent également un grand nombre de sujets de recherche scientifique. Enfin, de nombreuses activités de la section 11 sont tournées vers le développement de colloïdes et de sondes pour l'imagerie médicale.

e. Alimentation

Le monde de l'agro-alimentaire fait aujourd'hui face à de nombreux défis : consommation excessive des ressources naturelles, appauvrissement des sols et de la biodiversité, insécurité alimentaire, régimes pauvres en nutriments, vieillissement et sédentarisation de la population, gaspillage, Pour relever de tels défis, diverses transitions doivent être mises en place pour favoriser des systèmes alimentaires sains et durables. Ces problématiques sur l'alimentation et les systèmes alimentaires relèvent en premier lieu de l'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement), mais il apparaît aujourd'hui nécessaire d'associer à ses recherches des Unités du CNRS qui y apportent leurs complémentarités. Dans cette logique, deux GDR actuellement en cours, SLAMM (Solliciter LA Matière Molle) et DUMBIO (DURabilité et Matériaux BIOsourcés), sont communs avec l'INRAE (co-direction et co-financement).

De fait, certaines problématiques liées à l'alimentation entrent dans le périmètre de la section 11 et plusieurs équipes commencent à appliquer leurs expertises à des systèmes physico-chimiques alimentaires réels. Ainsi, lorsqu'on cherche à réduire l'impact énergétique de procédés (extraction d'ingrédients ou mise en forme d'aliments), à développer de nouveaux ingrédients respectueux de l'environnement et pour une meilleure santé, ou pour développer de nouvelles matrices alimentaires aux propriétés adaptées pour des consommations spécialisées, on fait appel aux thématiques et mécanismes génériques suivants : relations structure-fonctionnalité, stabilité colloïdale, auto-assemblage, coacervation, encapsulation, relargage et déstructuration, couplage multi-échelle pour déterminer les origines microscopiques de propriétés de surface et en volume (rhéologiques en particulier). De même, les connaissances sur les interactions

entre tensioactifs, polyélectrolytes et nanoparticules synthétiques (en volume et aux interfaces) sont utiles pour appréhender les interactions entre ingrédients alimentaires (lipides, peptides, polysaccharides, protéines, fibres, ...), sachant que la variabilité inhérente à des ressources naturelles ajoute une complexité nouvelle, source de défis pour la communauté de la matière molle.

IV. Evolution des grandes thématiques de la section 11

a. Thématiques en plein essor

Chimie

Les thématiques émergentes en lien avec la chimie des polymères sont principalement liées aux défis environnementaux et sociaux actuels et aux obligations légales associées. L'accès à des polymères historiquement obtenus à partir de ressources fossiles est désormais envisagé à partir de bioressources ou d'effluents de déchets comme le CO₂ pour la synthèse de polycarbonates par exemple. Ces efforts pour atteindre des voies de synthèse en accord avec les grands principes de la chimie verte sont désormais associés à des études concernant la fin de vie de ces matériaux. L'étude du recyclage et/ou de la dégradation des polymères par différents procédés innovants de dépolymérisation ou de surcyclage est une activité en pleine effervescence. D'un point de vue général, les développements réalisés en chimie des polymères doivent prendre en compte l'analyse globale de leur cycle de vie. Enfin, l'importance de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine des polymères connaît un essor important soutenu récemment par le PEPR exploratoire DIADEM et pourrait permettre, par exemple, le développement de nouveaux procédés de synthèse plus durables pour des polymères à haute valeur ajoutée.

L'utilisation de microorganismes pour le recyclage de polymères de commodité, désormais bien avancée, permettra idéalement de traiter divers types de déchets plastiques simultanément et indifféremment de leur nature chimique et de leurs additifs. La compréhension des mécanismes réactionnels de polymérisation et de dégradation est essentielle et étudiée selon une approche expérimentale combinée à des études computationnelles. De même, la caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux est essentielle à l'optimisation de leur cycle de vie. L'étude de la dégradation des matériaux polymères (formation de nano- et/ou microparticules) dans l'environnement terrestre et aquatique (océan, rivières), à l'interface avec la biologie et les sciences humaines et sociales, fait partie intégrante de l'équation. La fin de vie des polymères se doit d'être plus vertueuse et d'offrir différentes options adaptées à la nature chimique du polymère. Les recherches doivent inclure et intégrer l'analyse du cycle de vie complet des matériaux polymères « du berceau à la tombe », tout en élaborant des nouveaux polymères présentant des propriétés au moins identiques aux plastiques actuels, voire améliorées notamment en termes de fin de vie, en adéquation avec les applications visées. Bref, la chimie des polymères moderne doit impulser le passage d'une économie « linéaire » des polymères à une économie « circulaire ».

Physico-chimie

La démarche de synthétiser et/ou de valoriser des tensioactifs, des stabilisants, des polymères, d'origine biologique (biosourçage) pour en faire des systèmes physico-chimiques sophistiqués est également de plus en plus prégnante dans les recherches. Les procédés de nanofluidique, faisant intervenir ou non des membranes, le transport en

milieux poreux réactifs, ou les matériaux durs obtenus à partir de précurseurs mous (GDR SoPhy) font aussi l'objet de recherches de plus en plus soutenues dans le périmètre de la section 11. Les assemblages de précision formés par des liens d'ADN, pour induire une programmation fonctionnelle, et l'encodage rapide d'information sur l'ADN *via* la conception de nouvelles enzymes (PEPR MoleculArxiv), sont d'autres axes de recherche émergents reposant sur les connaissances génériques en physico-chimie de la matière molle.

La science des aliments est de plus en plus présente dans les recherches en matière molle, comme en témoignent des initiatives de structuration d'une communauté en lien avec ce thème porté par des équipes de la section 11 (cycle de conférences « Edible Soft Matter », GDR SLAMM et DUMBIO).

Les études sur la physico-chimie des sols (remédiation, bio-augmentation, compostage) sont également en émergence au sein des laboratoires de la section 11, avec une prise en compte plus avancée des couplages entre l'activité des bactéries, l'hétérogénéité du milieu et les transports de fluides. Les dispersions complexes telles que les systèmes liquide-liquide, les mécanismes d'auto-émulsification, de coacervation et d'encapsulation restent aussi une source d'innovation forte pour de nombreuses équipes.

Par ailleurs, un thème de recherche toujours en effervescence et très répandu dans la communauté de la matière molle est celui de l'élaboration de systèmes colloïdaux ou d'hydrogels répondant le plus sensiblement et spécifiquement possible à un *stimulus* extérieur.

Physique

En physique de la matière molle, deux thématiques solidement établies ne cessent de prendre de l'ampleur ces dernières années. La première est le transport fluidique aux nano-échelles. Cette thématique associe étroitement l'étude des phénomènes fondamentaux –notamment quantiques–, et innovations industrielles ou applications à fabrication de systèmes de synapses bio-inspirées. La seconde est la matière active qui demeure en pleine effervescence, élargissant toujours son périmètre, qu'il s'agisse de nouveaux matériaux, de systèmes vivants, d'applications de robotique molle ou d'écologie des micro-organismes. A l'interface entre physique, chimie et biologie, la section 11 est particulièrement bien positionnée pour développer ces nouvelles directions de recherche d'un point de vue expérimental et théorique.

Des thématiques traditionnellement associées aux polymères connaissent actuellement un regain d'intérêt. C'est le cas par exemple de la séparation de phases liquide-liquide qui sous-tend la formation d'organelles sans membrane, un processus crucial dans le fonctionnement des cellules. Les protéines intrinsèquement désordonnées constituent également une nouvelle frontière, qui intéresse plusieurs communautés (biologie structurale notamment). La spécificité de la section 11 est de les aborder comme une classe particulière de polymères, en se focalisant sur les propriétés génériques.

Enfin, les outils transversaux de l'apprentissage machine et de l'IA trouvent progressivement leur place. L'apport essentiel réside le plus souvent dans un gain d'efficacité, notamment pour l'analyse automatique d'images, les tâches de classification et l'inférence de potentiel effectif pour des simulations multi-échelles. Ces progrès méthodologiques s'insèrent le plus souvent dans un cadre déjà existant.

Interface avec la biologie

À l'interface avec les systèmes biologiques, les activités de valorisation de la biomasse pour l'environnement et celles liées aux problématiques de dépollution,

s'appuyant sur les glycosciences et les polymères biosourcés, sont en plein essor. La multimodalité dans le domaine de la vectorisation de substances thérapeutiques ou préventives, pouvant coupler ou non le diagnostic, la thérapie et l'imagerie, représentent également l'objectif d'un grand nombre de recherches en section 11. La biophysique quantitative et l'élaboration de modèles tridimensionnels sont également des thématiques en pleine effervescence. Elles impliquent le développement d'une large palette d'approches allant de la biophysique expérimentale et théorique, aux approches d'ingénierie tissulaire et l'utilisation de la microfluidique. Cette large palette reflète la richesse et la complémentarité des compétences disponibles au sein de la section 11.

Science et ingénierie des matériaux

La compréhension des relations structure-dynamique-propriétés des matériaux polymères et composites en volume, en surface et aux interfaces déploie une forte interdisciplinarité au sein de la section 11. Le triptyque « synthèse-mise en forme-caractérisation » typique de la science des matériaux est transversal par essence. Au-delà de systèmes modèles ou de systèmes industriels complexes, la discipline s'élargit aujourd'hui, en amont, en intégrant des chimies innovantes (fonctions stimulables, chimie covalente réversible, mécanophores, synthons biosourcés) et en aval, en visant des applications ou systèmes fonctionnels qui répondent aux défis sociaux (conversion/stockage d'énergie, membranes et transports en milieux poreux, biomatériaux, auto-réparation). Dans ce contexte, mieux comprendre et caractériser *via* des techniques couplées et multi-échelles les propriétés de transport, mais aussi le comportement en grande déformation, notamment les mécanismes fortement non-linéaires impliqués dans les processus de rupture, d'adhésion ou les capacités d'auto-réparation, mobilise l'intérêt de la communauté et permet de progresser dans le développement de systèmes architecturés, de métamatériaux ou encore de matière adaptative.

b. Thématiques en retrait

Chimie

La polymérisation par étapes est une méthode de production de nombreux polymères commerciaux, et représente une voie particulièrement active dans la valorisation de monomères biosourcés, en particulier dans la filière des lipides. Un renforcement de cette activité est important pour le développement de nouveaux matériaux répondant aux exigences nouvelles de cycle de vie. Les nouvelles approches catalytiques dans ce domaine, en particulier la catalyse organique, doivent être poursuivies et renforcées, et la catalyse enzymatique devrait être reconSIDérée, conjointement avec la biodégradation des matériaux synthétisés.

Physico-chimie

A l'heure où le développement de procédés « verts » est essentiel pour les enjeux environnementaux, les procédés plasma apparaissent comme extrêmement pertinents, ne nécessitant aucun solvant. Par ailleurs, les technologies plasma ont connu une forte évolution ces dernières années avec des dispositifs à pression atmosphérique, les plus acceptables en vue d'une industrialisation, devenant de plus en plus accessibles et modulables. Les avancées dans ce domaine ouvrent la voie à de nombreuses possibilités de traitements de surfaces polymères, voire de génération de structuration de surface. En France, seuls quelques enseignant·e·s-chercheur·e·s contribuent au développement de

ces recherches. Ces procédés demeurent d'intérêt majeur au moment même où les physicien·ne·s des plasmas font évoluer énormément ce domaine.

Physique

En 2019, la source française Orphée, alimentée par un réacteur nucléaire, a fermé. Ne reste plus que le réacteur de l'Institut Laue-Langevin (ILL), à Grenoble, qui est un équipement international, partagé essentiellement avec l'Allemagne et le Royaume-Uni. Il s'en suit une baisse de l'activité française en neutronique, domaine dans lequel la France, en particulier dans le domaine de la physique des polymères, et plus généralement de la matière molle, a eu un rôle de leader. La construction d'une nouvelle source nationale, baptisée ICONE, sans réacteur nucléaire, paraît être un enjeu majeur pour la recherche française en matière molle. Le maintien de l'activité de l'ILL, tant que l'ESS (*European Spallation Source* en Suède) n'est pas totalement fonctionnelle, demeure un autre enjeu.

Interface avec la biologie

Les études de morphogénèse à différentes échelles sont moins développées ces dernières années bien qu'étant historiquement des activités fortes de la section 11. Enfin, on note que les activités sur la dynamique de protéines en surface sont actuellement peu représentées alors que les enjeux autour de ces thématiques sont considérables pour la compréhension des interactions avec le vivant mais aussi d'un point de vue plus applicatif, par exemple dans le domaine pharmaceutique.

Science et ingénierie des matériaux

L'activité historique autour de la maîtrise des procédés de mise en œuvre semble se réduire au profit du développement de travaux autour de la fabrication additive (principalement l'impression 3D). Une bonne connaissance des procédés tels que l'extrusion ou l'injection paraît néanmoins pertinente dans le cadre du développement de nouveaux matériaux (multiphasés, biosourcés, biodégradables et/ou recyclables, éco-conçus, ...) pour l'emballage, ou l'intégration de vitrimères à l'échelle industrielle.

On note également un manque d'affichage par les laboratoires de la section 11 concernant les travaux sur les matériaux de structure au profit des matériaux de fonction, sans doute corrélé au faible rayonnement des journaux scientifiques du domaine. Pourtant, dans un contexte socio-économique fortement impacté par les enjeux environnementaux, la recherche de nouveaux matériaux thermostables pour le transport (composites thermoplastiques haute performance pour l'aéronautique par exemple) s'avère particulièrement pertinente. Bien que de plus en plus pris en compte, les questionnements sur la réutilisation, la fin de vie ou le recyclage des matériaux thermoplastiques, thermodurcissables ou composites doivent évidemment devenir incontournables dans les travaux à venir.

V. Forces et opportunités de la section 11

La communauté scientifique dans le domaine de la matière molle est très active en France. Elle a développé une expertise au meilleur niveau dans les méthodes et procédés de synthèse macromoléculaire, mais elle reste un peu en retrait par rapport aux équipes internationales dans le domaine de l'utilisation de la modélisation et/ou l'analyse de données. L'intégration de l'IA dans la stratégie de synthèse macromoléculaire reste à ce jour assez marginale alors qu'elle se développe à l'international. Concentrer les forces et

accroître les compétences dans ce domaine passe non seulement par une formation adaptée dans les Universités, mais également par le recrutement de scientifiques de talent déjà formés et rompus à cet exercice. La conception de nouveaux polymères fonctionnels repose sur une exploration réussie des relations reliant leur structure à leurs propriétés. Dans ce contexte, les progrès de la chimie combinatoire et de l'apprentissage automatique offrent des opportunités intéressantes pour l'ingénierie de nouveaux matériaux polymères répondant à des cahiers de charge préétablis. L'exemple de la biologie montre que partant de monomères à la chimie simple, il est possible d'obtenir des macromolécules fonctionnelles avec des propriétés souhaitées. A l'instar des protéines, les polymères synthétiques possèdent d'innombrables combinaisons de monomères qui peuvent se traduire par des propriétés diverses et variées. Étant donné la grande diversité de monomères possibles, la complexité des matériaux polymères se manifeste par une explosion combinatoire, ce qui rend inenvisageable une conception rationnelle lorsque le nombre de monomères différents dépasse quelques unités. Inspirée par le développement récent de PolyID, un outil de prédiction des propriétés des polymères à l'aide de méthodes d'apprentissage machine reposant sur une base de données de milliers de polymères, il est possible d'imaginer que la science des polymères connaîtra un nouvel essor en combinant les méthodes d'IA et de fouille de données et l'exploitation de bases de données expérimentales ou numériques. C'est pourquoi, en 2024, le CNRS a décidé d'ouvrir un poste de Chaire de Professeur Junior (CPJ) sur ce thème en émergence.

Les recherches en physico-chimie, qu'elles portent sur les assemblages, les interfaces, ou encore sur les mécanismes élémentaires permettant d'établir un lien multi-échelles entre la structure et les propriétés de « l'objet », sont en constante évolution. Ces « objets » peuvent être des systèmes supramoléculaires, des suspensions colloïdales, des dispersions (telles que des mousses ou des émulsions), des gels, des élastomères, des réseaux polymères transitoires et/ou réversibles, des colloïdes nanostructurés, des films ou revêtements polymères (texturés ou non). Il s'agit d'un domaine en plein essor qui offre d'immenses possibilités en matière de conception de matériaux fonctionnels.

Si la physique des polymères a atteint un certain niveau de maturité pour des questions classiques comme la structure et la dynamique des chaînes en milieux dense ou dilué, elle reste constitutive pour la compréhension de la matière biologique où se posent souvent aussi des nouvelles questions fondamentales. Les polymères atteignent des rigidités (microtubules), longueurs et temps de relaxation méso- ou même macroscopiques (ADN/chromosome), ont des compositions individuelles (protéines) ou collectives (cellules) plus complexes où chaque composante n'est présente qu'en petit nombre s'impliquant dans l'assemblage et le désassemblage dynamique de diverses structures éphémères. La matière biologique est surtout intrinsèquement hors-équilibre avec, pour la matière molle, toute la complexité qui émerge de l'interaction entre les chaînes et les moteurs moléculaires (dans le cytosquelette et le noyau).

Conclusion

L'interdisciplinarité est au cœur de la science de la matière molle en couvrant le continuum de la chimie à la physique avec la physico-chimie comme dénominateur commun, avec des interfaces fortes avec l'ingénierie et la biologie, selon des approches et des perspectives différentes mais convergentes, pour la grande variété des objets, systèmes et matériaux étudiés. Cette unité dans la diversité est indéniablement un atout de la section 11 qui permet de décloisonner les disciplines traditionnelles, à l'instar des

environnements scientifiques que l'on peut trouver aussi bien dans les grands départements de *Polymer Science & Engineering* ou *Chemical Engineering* aux Etats Unis que dans les centres d'excellence labellisés *Indian Institute of Technology* en Inde. Il apparaît ainsi crucial aux membres de la section 11 de préserver l'interdisciplinarité afin de poursuivre le plus efficacement possible la mise en synergie de ses forces et la structuration de cette large communauté scientifique aux compétences pluridisciplinaires et complémentaires.

En intégrant les enjeux environnementaux à leurs recherches, cette communauté de chimistes, physico-chimistes et physicien·ne·s très dynamique vise à répondre aux grands défis sociétaux du 21^{ème} siècle, notamment dans les domaines du développement durable, de l'environnement, de l'énergie, des transports, de la santé et de l'alimentation.

