

SYSTÈMES SUPRA ET MACROMOLÉCULAIRES : PROPRIÉTÉS, FONCTIONS, INGÉNIERIE

Président de la section

Serge PEREZ

Membres de la section

Patricia BASSEREAU

Emanuel BERTRAND

Bernadette CHARLEUX

Patrick DAVIDSON

Gero DECHER

Alain DURAND

Laurent FONTAINE

Cyprien GAY

Jean-François GÉRARD

Martin IN

Dimitri IVANOV

Maryse JOLY

Françoise LAFUMA

Hélène LANNIBOIS-DRÉAN

Christian LIGOURE

Monique MAUZAC

Alain RAMEAU

Philippe RICHETTI

Jean-Claude SOUTIF

AVANT-PROPOS

Les délais impartis pour la réalisation d'un rapport de conjoncture et d'un rapport de perspectives ne nous ont pas permis d'obtenir une validation du document joint, par l'ensemble des membres de la section 11. Cette validation ne pouvant se faire qu'après examen du texte et débat, lors de la session d'automne 2006. Il convient donc de considérer comme provisoire, l'ensemble de ce rapport. La partie « conjoncture » de ce rapport a été élaborée selon des analyses et réflexions qui avaient débuté lors de la session de printemps 2005. De ces analyses et réflexions peuvent naturellement être émis quelques éléments de prospective ; ces éléments accompagnent les présentations des différentes thématiques scientifiques de la section. N'ayant pas fait l'objet de discussions plus approfondies et de validation, c'est volontairement que nous n'avons pas souhaité les rassembler au sein d'un rapport de perspectives scientifiques. Le rapport final vous sera communiqué après son adoption en séance plénière par la section.

1 - INTRODUCTION

• Au début des années 90, des chercheurs chimistes, physiciens, et physico-chimistes, concernés par des préoccupations communes se rassemblaient au sein d'une même section du Comité National de la Recherche Scientifique. Du premier intitulé « *Systèmes moléculaires complexes* » (1992-2004) au plus récent « *Systèmes supra et macromoléculaires : propriétés, fonctions, ingénierie* » (depuis 2005), cette communauté s'est construite et s'est illustrée par des contributions remarquées à l'échelle internationale. Les préoccupations de cette communauté concernent les systèmes moléculaires de taille mésoscopique qui peuvent être décrits à l'aide de concepts et d'outils communs ; ces systèmes peuvent être élaborés à partir de véritables liaisons covalentes ou au travers d'interactions moléculaires faibles. Une caractéristique commune à ces systèmes est la gamme d'échelles auxquelles ils peuvent être ordonnés (du nanomètre au micromètre). De cette organisation résultent un certain nombre de propriétés remarquables, par exemple des réponses à des faibles perturbations. Il existe donc un continuum allant de la synthèse de molécules et macromolécules nouvelles, leurs mises en forme, jusqu'aux études physico-chimiques et physiques. Les activités fondatrices de la communauté se déclinent autour de la chimie des molécules de bas poids moléculaires (cristaux liquides, amphiphiles, etc.) pour l'élaboration de Systèmes Moléculaires Organisés, de la chimie, macromoléculaire, et de la physique et physicochimie des systèmes résultant de ces chimies. La prise en compte de systèmes constitués de biopolymères et de matériaux macromoléculaires naturels, est également une des caractéristiques de cette section. Les mots clefs qui caractérisent la section 11 sont les suivants :

– conception, synthèse et propriétés d'objets moléculaires, supramoléculaires et macromoléculaires ;

– physique et Physico-chimie des systèmes moléculaires organisés (colloïdes, cristaux liquides, amphiphiles, surfaces et interfaces) ;

– procédés de polymérisation et mise en forme des polymères ;

– matériaux polymères et biomatériaux ;

– physique et chimie des objets biologiques des macromolécules biologiques et de leur assemblage.

Ces derniers volets correspondent à une évolution forte d'une partie de notre communauté qui se préoccupe davantage de questions fondamentales et d'applications dans le domaine des Sciences du Vivant, du Diagnostique, et de la Thérapeutique. Alors que certaines de ces préoccupations sont déjà anciennes (biopolymères, environnement, vectorisation de principes actifs, etc.) d'autres impliquent des physiciens dans l'étude de phénomènes biologiques complexes et dans les développements concomitants d'instrumentations dédiées. De ce point de vue, la section 11 se revendique du point triple : biologie-chimie-physique, et constate en son sein la progression constante des concepts et outils requis pour aborder cette nouvelle complexité.

• Les départements scientifiques concernés par les activités de la section sont : Chimie, Mathématiques, Physique, Planète et Univers ; Sciences du Vivant, Ingénierie.

La section 11 en chiffres :

Chercheurs : 273 chercheurs CNRS, dont 206 gérés par le Département SC, 53 par le Département MPPU. 7 chercheurs sont affectés dans des laboratoires relevant du Département Ingénierie, 7 dans des unités relevant du Département Sciences du Vivant.

Le nombre d'ITA est de 280, alors que 361 enseignants-chercheurs s'identifient à des thématiques portées par la section 11.

Les chercheurs de la section participent à 20 GDR.

Section 11 principale

Département SC

UPR 4 (ICS, CRPP, ICSIM, CERMAV)

UMR 13 (Enseignement Supérieur)

UMR 4 (Industrie, Fondations...)

FRE 2

Département MPPU

UMR 3 (Enseignement Supérieur, CEA, INSERM)

Section 11 secondaire

Département SC MPPU ING SDV

Unités 13 11 6 6

• Le présent rapport (1) débutera par une présentation de l'état de l'art et des perspectives des divers axes scientifiques qui constituent le socle thématique de notre section.

- 1. Chimie des Polymères et de la Matière Molle ;
- 2. Matériaux et Systèmes Fonctionnels ;
- 3. Physique et Physico-Chimie de la Matière Molle ;
- 4. Surfaces et Interfaces ;
- 5. Interface Physique-Biologie ;
- 6. Théorie et Simulation.

Un tableau récapitulatif permet d'apprécier les laboratoires concernés par ces différentes thématiques.

• Dans une deuxième partie, ce document fera état des relations dans lesquelles les personnels de la section sont impliqués au sein du CNRS. Ceci permet de dégager quelques éléments de réflexion quant au positionnement de la section au sein de l'établissement. Le partenariat fort qui existe avec l'enseignement supérieur fait l'objet d'une analyse fine révélant des éléments d'inquiétude quant au recrutement à venir de chercheurs et leur impact sur le devenir des unités de recherche. Une enquête menée auprès de l'ensemble des unités de recherche relevant de la section a permis de confirmer l'intensité des liens noués avec l'industrie. Quelques réflexions sur les transferts technologiques et l'évaluation des actions de valorisation sont également présentées. Une mention particulière est naturellement réservée à l'insertion des unités de

recherche dans l'espace européen de la recherche, analysant l'intensité de leurs participations aux programmes communautaires.

2 – CHIMIE DE LA MATIÈRE MOLLE

Les chimistes de la matière molle utilisent les concepts et les outils de la chimie macromoléculaire ou de la chimie organique pour élaborer de nouveaux systèmes moléculaires organisés. S'ils ne développent pas de nouvelles voies de synthèse, ils sont à l'affût de leurs développements pour les adapter à leurs besoins, c'est-à-dire, moduler la portée, l'intensité et la spécificité des interactions entre colloïdes.

Dans leurs évolutions récentes, les chercheurs œuvrant dans ce champ de recherche visent à diversifier le type des interactions en jeu. Les interactions hydrophobes ne sont plus les seuls moteurs de l'auto-association ; les liaisons hydrogène, mais également les interactions de nature bio-inorganique (empruntées de la chimie de coordination) sont également mises à profit (comme l'indique le nouvel intitulé de la section). Une des propriétés recherchées est la « *stimulabilité* », avec l'ambition de combler un fossé entre l'échelle nanométrique et l'échelle macroscopique. On s'approche, en cela des démarches « *bottom-up* » qui sont mises en œuvre dans le cas des matériaux hiérarchisés. Ces nouvelles tendances traduisent le rapprochement de la matière molle et de la matière dure (minérale et organique, nanotubes de carbone et polymères, etc.).

De nombreux articles de prospectives montrent que l'auto-assemblage est désormais envisagé à des échelles plus grandes que celle de la molécule. L'auto-assemblage proprement contrôlé constitue un procédé de mise en forme. La chimie supramoléculaire et la physico-chimie de l'auto-assemblage se rencon-

trent autour de ce que l'on pourrait appeler la chimie « supra-colloïdale ».

Pour le premier aspect, auto-assemblage à des échelles de plus en plus grandes, deux approches sont possibles : la première relève du procédé et consiste à manipuler les colloïdes un par un pour les disposer comme on l'entend. Cette approche fait appel à des dispositifs de types micro-fluidiques (dont les développements concernent aussi notre section). La deuxième est une approche moléculaire et à l'équilibre qui est a priori plus difficile mais qui présente l'avantage d'être plus facilement transposable à la production à grande échelle. Pour cette seconde approche, la chimie des petites molécules est d'une importance capitale puisqu'elle crée les briques de base des assemblages ainsi que les agents de couplage qui permettront de contrôler leurs interactions et de les associer.

Le second aspect qui concerne la mise en forme de matériaux par auto-assemblage peut être illustré par la formation de matériaux minéraux mésoporeux autour d'auto-assemblages de tensioactifs ou de particules colloïdales. De ce point de vue, la section 11 n'a pas été souvent à l'initiative de cette démarche. En revanche, les concepts qui s'y sont développés sont couramment utilisés et les chimistes du solide impliqués dans ce type de recherche sollicitent des collaborations au sein de notre communauté aussi bien pour disposer de molécules nouvelles, que pour bénéficier d'outils et de compétences en analyse structurale (diffusion centrale de rayonnement, structure lyotrope et thermotrope, etc.).

Enfin le troisième aspect qui semble contenir les prémices d'un rapprochement entre la chimie supramoléculaire et la physico-chimie de l'auto-assemblage résulte du fait que lorsque l'on veut doter un auto-assemblage d'une fonctionnalité on est amené à le considérer dans sa spécificité. Or traditionnellement, la physicochimie de la matière molle, dans ses développements théoriques les plus spectaculaires, a eu comme démarche de privilégier des aspects très universels, indépendants des détails moléculaires de l'auto-assemblage et de leur comportement. On

s'est plus intéressé à des effets entropiques (déplétion, fluctuations, etc.) qu'à la composante enthalpique et spécifique. Pour obtenir des auto-assemblages fonctionnels (c'est-à-dire avec faculté de reconnaissance, d'adaptation ou de stimulation) la chimie de synthèse reste encore le verrou principal.

Les chimistes de la matière molle de la section 11 et qui ne sont pas des polyméristes sont en fait un peu « dilués » et peu visibles (certains même un peu amers, etc.). Leurs thèmes de recherches et leurs objectifs sont parfois plus visibles et mieux reconnus dans d'autres sections (telles que la section 12 : Architectures moléculaires : Synthèse, mécanisme et propriétés ou la section 15 : Chimie des matériaux, nanomatériaux et procédés) et l'on a vu parfois la difficulté de certains chercheurs à se positionner au sein de l'une ou l'autre de ces sections. De ce point de vue, le récent transfert d'une équipe importante de la section 12 vers la section 11 témoigne de l'importance des recherches qui s'y développent et constitue un bel atout pour l'importance de notre section dans le domaine des auto-assemblages.

3 – CHIMIE DES POLYMÈRES, MATÉRIAUX ET SYSTÈMES FONCTIONNELS

3.1 CHIMIE DES POLYMÈRES

La chimie macromoléculaire s'oriente vers un contrôle toujours meilleur, toujours plus parfait, des architectures de chaîne, ce qui passe par la proposition de nouveaux mécanismes réactionnels ou l'amélioration de la connaissance des mécanismes existants ; cette démarche est souvent indissociable de l'étude approfondie du procédé de synthèse. L'objectif, dans cette approche, est de pouvoir contrôler à une échelle supérieure les assem-

blages macromoléculaires pour aller vers des assemblages supramoléculaires, des matériaux dont on sait maîtriser les propriétés, et des systèmes complexes. Ce sont donc les grandes voies de synthèse macromoléculaire qui sont à l'origine de toute démarche tournée vers l'élaboration d'architectures : polymérisations ioniques (anionique et cationique des éthyléniques, ouverture de cycle), polymérisations des oléfines par coordination, polymérisation radicalaire, polycondensation, modification chimique.

Dans la plupart des grandes méthodes de polymérisation, seuls quelques laboratoires français sont bien impliqués dans l'étude et l'amélioration des systèmes et la proposition de nouvelles méthodes de synthèse et sont reconnus au niveau international pour leurs travaux. Les succès et la renommée internationale peuvent avoir diverses origines :

- i) un savoir-faire et une connaissance fondamentale historiquement bien établis qui assurent encore une bonne visibilité, mais avec un avenir incertain (cas des polymérisations anioniques et cationiques) ;

- ii) un soutien industriel qui vise le long terme (polymérisation radicalaire, catalyse de polymérisation, procédés de polymérisation ou de modification chimique comme l'extrusion réactive, polymérisations en milieu dispersé, et dans une moindre mesure polycondensation) ;

- iii) une impulsion donnée par le CNRS, le Ministère via des programmes incitatifs ou des programmes/réseaux européens, avec l'ouverture vers d'autres disciplines (catalyse, radicalaire, extrusion réactive).

Il ne faut pas nécessairement augmenter le nombre de laboratoires impliqués car le morcellement serait fatal à une bonne visibilité internationale, mais renforcer les équipes existantes et déjà reconnues, en insistant sur l'émergence de nouvelles thématiques.

La faiblesse du domaine est probablement le fait d'un trop grand cloisonnement des disciplines. L'ouverture vers la synthèse organique, la catalyse homogène et hétéro-

gène, la biologie, etc. a montré par le passé toute son efficacité pour la conception de nouvelles voies de synthèse.

Beaucoup d'équipes et de laboratoires utilisent la synthèse macromoléculaire comme un outil d'élaboration de polymères fonctionnalisés ou fonctionnels avec des propriétés bien définies. La relation entre structure macromoléculaire et propriété visée est donc au cœur de la démarche mise en œuvre. Cette démarche est donc moins tournée vers la compréhension fine des étapes élémentaires de la polymérisation mais reste néanmoins une approche de chimiste des polymères et utilise les mêmes outils. De très nombreux domaines d'application sont ainsi concernés : peintures, revêtements, membranes, optique, électronique, biomédical (diagnostic et thérapeutique), cosmétique, analyse chimique, purification, etc. L'approche est souvent indissociable de celle qui est appliquée dans le domaine des matériaux et systèmes fonctionnels décrit ci-après, même si elle reste en amont.

3.2 MATÉRIAUX ET SYSTÈMES FONCTIONNELS

L'activité de recherche dans le domaine des matériaux polymères recouvre de nombreux domaines et ainsi diverses communautés réunies sur une démarche « Matériau » qui a intrinsèquement un caractère pluridisciplinaire associant :

- des approches et outils empruntés à la chimie macromoléculaire et la physico-chimie pour l'élaboration de matériaux à partir de briques élémentaires : monomères, oligomères fonctionnels, copolymères structurants, nano-objets organiques, inorganiques ou hybrides, etc. assemblés par des liens chimique (polymérisation) ou physique (cristallisation, séparation de phase, etc.) ;

- des approches et méthodologies de physique des matériaux associées aux sciences de l'ingénieur ;

– la prise en compte des procédés avec leurs différents volets liés au génie des procédés.

Cette démarche « Matériau » prenant en compte les divers domaines chimie/procédés/physique, reconnue dans le monde anglo-saxon sous la terminologie « Materials Engineering », reste rarement mise en œuvre dans les laboratoires français compte-tenu du morcellement du paysage scientifique avec des laboratoires ayant pourtant des expertises reconnues dans chacun des domaines.

La chimie macromoléculaire est en effet essentielle pour le design de matériaux macromoléculaires puisqu'elle gouverne la synthèse et l'assemblage des briques élémentaires décrites au dessus mais aussi pour la génération d'interfaces définies et pour la durabilité des matériaux (vieillesse chimique notamment). La synthèse macromoléculaire et la modification chimique conventionnelles sont donc mises en jeu dans cette démarche « Matériau » mais cette dernière se distingue toutefois de la démarche traditionnelle de la chimie macromoléculaire, principalement focalisée sur l'étude des mécanismes élémentaires de polymérisation, en s'intéressant à leurs usages et à l'analyse des processus chimiques en situation d'élaboration des matériaux, allant quelquefois jusqu'aux conditions de procédé. En effet dans ces conditions, des phénomènes de diffusion, des phénomènes thermiques, etc. peuvent perturber les processus chimiques et physiques et requérir un retour sur les étapes élémentaires de la synthèse pour conduire aux comportements physiques visés. Développer un nouveau matériau polymère en prenant en compte en particulier des critères liés aux procédés impose de s'intéresser au développement de formulations faisant appel alors aux méthodologies et concepts de physico-chimie. De la même façon, cette approche globale peut permettre de faire appel à la chimie verte ou à des approches de chimie durable, des conditions de procédé d'élaboration plus respectueuses de l'environnement, approches encore peu développées dans nos laboratoires « Matériaux ».

Dans la dernière décennie des matériaux innovants ont ainsi pu être préparés dans les

équipes de recherche de la section 11 du CN en :

– associant chimie des polymères et autres chimies comme la chimie minérale, sol-gel par exemple. Dans ce dernier cas, des actions de recherche rapprochant les communautés du sol-gel et des polymères ont permis en France au meilleur niveau international, des approches très originales pour le design de matériaux hybrides organiques-inorganiques nanostructurés y compris dans des conditions de procédé d'élaboration de matériaux polymères conventionnels ;

– visant des morphologies nanostructurées en considérant des nano-objets organiques (copolymères à blocs, polymères hyper-ramifiés, clusters organiques-inorganiques, nanoparticules et nanotubes) ;

– s'intéressant à des concepts de chimies supramoléculaires en utilisant les processus d'assemblage pour le design d'architectures et morphologies de matériaux polymères, approche qui peut être associée à des chimies de polymérisation à la fois pour la synthèse d'objets polymères assemblables ou pour le blocage des nanostructures obtenues (réticulation) ;

– prenant en compte des précurseurs ou objets macromoléculaires naturels (pouvant être associés à des structures moléculaires ou macromoléculaires synthétiques) ayant des architectures ou morphologies possibles grâce aux processus d'organisation spécifique. De tels matériaux sont désormais largement étudiés compte-tenu de leurs interactions spécifiques avec le milieu vivant.

Le volet « Physique » ayant trait à l'étude des comportements physiques des matériaux polymères en relation avec leur architecture moléculaire et leur morphologie à l'état fondu ou solide et leurs liens avec les conditions de procédé d'élaboration et de mise en forme est également très présent dans la communauté Polymères française. Des laboratoires français ont une indéniable avance dans certains domaines comme celui de la rhéologie des matériaux polymères pour leur mise en forme et la compréhension par exemple des méca-

nismes d'adhésion. Pour d'autres volets, comme celui de la mécanique des polymères, les laboratoires français ne tiennent plus la même place que celle acquise lors du développement d'approches physiques issues de la mécanique des métaux. Cette analyse des comportements physiques dans la démarche « Matériaux Polymères » nécessite bien entendu le développement de méthodologies expérimentales mais aussi de modélisation. Dans ce domaine, si seulement quelques équipes de recherche s'intéressent au développement d'outils de modélisation moléculaire (atomistique ou mésoscale) et mécanique, peu de travaux prennent en compte des approches multi-échelles comme cela est fait aux États-Unis notamment pour une compréhension des comportements et les liens avec les processus chimiques ou physiques ainsi qu'avec les paramètres de procédé ayant conduit à de telles microstructures. On peut noter dans ce domaine, le fort intérêt ces dernières années des laboratoires de notre communauté pour les nanomatériaux même si peu de travaux se sont réellement intéressés au lien des propriétés physiques apportées par l'échelle nanométrique de l'organisation introduite et à la définition d'une échelle pertinente de définition de la microstructure.

Enfin des matériaux très novateurs ont été élaborés grâce à des processus physiques comme l'assemblage d'objets macromoléculaires ou hybrides y compris dans des outils d'élaboration de matériaux polymères conventionnels (extrusion). Si l'utilisation de telles approches ont permis de belles réalisations, notamment avec des copolymères à blocs, réalisations essentiellement dans le domaine des films minces et des surfaces, celles-ci restent rares pour l'élaboration d'autres types de matériaux alors que des activités de recherche très actives sont menées à l'étranger.

La prise en compte des procédés et de leurs paramètres est essentielle pour la compréhension à la fois des comportements physiques et des retours nécessaires à la chimie de polymérisation et de formulation. L'analyse fine de l'influence des paramètres de procédés avec lesquels sont mis en œuvre les matériaux

implique en effet de comprendre le couplage avec la chimie de polymérisation et les processus physiques en situation d'élaboration et de mise en forme. Des laboratoires en s'intéressant à des polymères élaborés par voie fondu souvent couplée à des approches de simulation et d'autres à des matériaux élaborés à partir de systèmes réactifs, ont acquis dans ce domaine une réelle reconnaissance internationale. De réelles opportunités existent pour le développement de nouveaux matériaux polymères à microstructures spécifiques en rapprochant les communautés de rhéologues, du génie des procédés, de la chimie macromoléculaire et de l'analyse/modélisation des comportements physiques. Des structurations de type GDR pourraient catalyser de tels rapprochements.

Dans cette démarche globale « Matériau » associant les trois volets, chimie des polymères/procédés d'élaboration et de mise en forme/physique des matériaux, des axes nouveaux de recherche pourraient se développer :

- approches « combinatoires » : Peu nombreux sont les laboratoires de la communauté des matériaux polymères qui ont intégré une telle démarche pouvant nécessiter des dispositifs expérimentaux coûteux notamment pour l'analyse des propriétés ;

- approches de type « Life Cycle Engineering » permettant de revenir notamment sur des chimies des matériaux ou des procédés d'élaboration et de mise en forme plus respectueux de l'environnement (retour sur des outils de la chimie durable).

Si des matériaux polymères sont intégrés dans des « systèmes » ou de démonstrateurs dans quelques cas, notamment quand ceux-ci ne requièrent pas d'investissements importants dans leur conception et fabrication, la mise en situation d'application afin de vérifier la pertinence des architectures et des morphologies créées reste rare. Celle-ci fait en effet souvent appel à des compétences qui ne se sont pas présentes dans les laboratoires polymères comme par exemple la micro-fabrication, la nanolithographie, etc. Cette intégration dans des systèmes est le plus souvent réalisée dans

des centres de recherche et développement d'organismes comme le CEA ou d'industriels partenaires notamment dans le secteur de la microélectronique. Cette faible capacité de pouvoir aller vers la définition de démonstrateurs pertinents pour l'intégration de polymères, opportunité qui existe dans d'autres groupes de recherche étrangers comme en Allemagne dans les MPI, est associée une nouvelle fois à une fragmentation des groupes de recherche souvent définis sur un des volets de la démarche « Matériau » qui serait complète et riche en interactions entre communautés scientifiques en considérant les aspects Chimies/Procédés/Propriétés Physiques/Systèmes.

3.3 BIOPOLYMÈRES ET MATÉRIAUX MACROMOLÉCULAIRES RENOUVELABLES

La présentation de ce thème ne saurait être complète sans mentionner les recherches menées dans le domaine des biopolymères et macromoléculaires naturels. Ces macromolécules, renouvelables sont générées chaque année sur des quantités estimées à 10^{12} tonnes. Les molécules et biopolymères glucidiques représentent la majeure partie de cette production, dont à peine 3% est mis à profit par l'homme. Ces macromolécules sont très largement présentes chez tous les organismes vivants, constituant la majeure partie des carapaces d'insectes, des parois cellulaires des bactéries, et se trouvent impliquées chez l'homme et l'animal dans la protection et le bon fonctionnement de certains tissus de l'organisme.

Associées à des protéines et à des lipides, elles apparaissent comme le chaînon nécessaire à de nombreux processus biologiques. Les biotechnologies les consomment comme source de carbone pour la fermentation des micro-organismes, et les valorisent en métabolites secondaires sous forme d'exopolysaccharides bactériens.

Ces différences d'origine se traduisent par des différences de structures, différences étro-

tement liées à des fonctions et à des propriétés spécifiques, qui permettent de comprendre l'intérêt économique de ces macromolécules. Avec ou sans valeur nutritionnelle, les biopolymères glucidiques sont des composés de base des industries alimentaires, qui vont jouer sur les propriétés rhéologiques pour renforcer, modifier, stabiliser la texture des différents aliments. Depuis les polysaccharides naturels traditionnels jusqu'à ceux issus de la biotechnologie, c'est toute une palette de propriétés physicochimiques qui est ainsi disponible, en permettant toutes les mises en œuvre envisagées en fonction des applications visées : épaississant, rétenteur d'eau, stabilisant, liant, gélifiant, floculant, etc. Compte tenu de tout ce potentiel, l'usage de ces biopolymères intéresse de nombreux autres domaines d'application, pour lesquels l'utilisation de méthodes de modifications chimiques n'est plus proscrite, modifications qui vont encore permettre d'élargir l'éventail des propriétés.

De très nombreuses structures glucidiques présentent une forte potentialité en matière d'activités biologiques qui autorisent leur utilisation dans de nombreux domaines : biomatériaux (ingénierie tissulaire), protection, vectorisation et libération contrôlée voire ciblée, de biomolécules (hormones, protéines, gènes), organes artificiels. Ces applications, dans leur ensemble, requièrent une maîtrise des structures aux différents niveaux d'organisation, s'appuyant à la fois sur la nature chimique des constituants, les différentes formes physiques qui peuvent en résulter (hydrogels, systèmes particuliers et/ou poreux), et la nature des interfaces. L'étude de ces macromolécules constitue une préoccupation majeure pour un certain nombre d'Unités de Recherches, qui étudient la constitution, la structure, les propriétés et les transformations de ces biopolymères (*il convient de remarquer que peu d'études concernent les transformations de type « cracking » qui permettraient d'utiliser la biomasse en tant que source de carbone et d'hydrogène, et qui produiraient les éléments de base dans des voies de synthèse*). Les problématiques propres aux recherches dans le domaine des polymères glucidiques conjuguent à la fois celles

**Tableau synoptique de l'activité des unités relevant de la section 11
Extrait des réponses à l'enquête de l'été 2006 classement par DS et par code unité**

Code unité	Nom	Ville	DS princ.	Sect. princ.	Chim. Polym. & Matière molle	Matér. Syst. Fonction	Phys. & Phys-Chimie	Surfaces Interf.	Phys. & Biol.	Théorie Simul.
UPR22	Institut Charles-Sadron (ICS)	Strasbourg	Chimie	11	5	5	5	4	3	5
UPR5301	Centre de recherches sur les macromolécules végétales (CERMAV)	Grenoble	Chimie	11	0	5	5	1	1	2
UPR8641	Centre de recherches Paul Pascal (CRPP)	Bordeaux	Chimie	11	2	5	5	2	4	3
UPR9069	Institut de chimie des surfaces et interfaces de Mulhouse (ICSIM)	Mulhouse	Chimie	11	3	5	3	4	3	1
UMR140	Laboratoire de chimie et procédés de polymérisation (LCPP)	Lyon	Chimie	11	4	1	0	0	0	0
UMR166	Physico-chimie des milieux aqueux complexes (PCMAC)	USA	Chimie	11	0	0	2	3	0	0
UMR168	Unité physico-chimie Gurté (PCC)	Paris	Chimie	11	3	0	0	0	5	3
UMR2714	Systèmes Macromoléculaires et Physiopathologie Humaine	Lyon	Chimie	11	4	0	0	0	0	0
UMR5041	Laboratoire matériaux organiques à propriétés spécifiques (LMOPS)	Lyon	Chimie	11	3	3	0	0	0	2
UMR5067	Physico-chimie des polymères	Pau	Chimie	11	3	2	3	2	0	2
UMR5073	Organisation moléculaire (évolution et matériaux fluores)	Montpellier	Chimie	12	3	2	0	0	0	0
UMR5076	Hétérochimie moléculaire et macromoléculaire (équipe IAM)	Montpellier	Chimie	12	5	4	0	0	0	0
UMR5085	Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux (CIRIMAT)	Toulouse	Chimie	15	0	4	0	2	1	0

Code unité	Nom	Ville	DS princ.	Sect. princ.	Chim. Polym. & Matière molle	Matér. Syst. Fonction	Phys. & Phys-Chimie	Surfaces Interf.	Phys. & Biol.	Théorie Simul.
UMR5144	Molécules Biomolécules et Objets Supramoléculaires Synthèse structure applications thérapeutiques	Bordeaux	Chimie	16	0	2	0	0	0	1
UMR5156	Laboratoire de Rhéologie des Matières Plastiques	St Etienne	Chimie	11	0	0	0	0	0	0
UMR5623	Interactions moléculaires et réactivité chimique et photochimique (IMRCP)	Toulouse	Chimie	11	4	4	1	2	0	0
UMR5627	Ingénierie des matériaux polymères	Lyon	Chimie	11	5	5	4	2	1	0
UMR5629	Chimie des polymères organiques (LCPO)	Bordeaux	Chimie	11	5	1	3	3	0	0
UMR5803	Laboratoire de Physico-Chimie Moléculaire (LPCM)	Bordeaux	Chimie	13	0	0	0	0	3	0
UMR6011	Unité de chimie organique moléculaire et macromoléculaire (UCO2M)	Le Mans	Chimie	12	2	3	0	0	0	0
UMR6120	Polymères Colloïdes Interfaces	Le Mans	Chimie	11	1	0	5	3	0	2
UMR6517	Chimie biologie et radicaux libres (GBRL)	Marseille	Chimie	12	3	0	0	0	0	0
UMR6522	Polymères biopolymères membranes	MIS/Aignan	Chimie	16	2	4	1	1	1	1
UMR7083	Laboratoire théorie et microfluidique (PCT)	Paris	Chimie	11	0	0	0	3	1	5
UMR7165	Laboratoire d'Ingénierie des Polymères pour les Hautes Technologies (IPHHT)	Strasbourg	Chimie	11	3	4	0	0	0	0
UMR7167	Matière Molle et Chimie (MMC)	Paris	Chimie	11	2	3	2	0	0	1
UMR7565	Structure et Réactivité des Systèmes Moléculaires Complexes (SRSMC)	Nancy	Chimie	13	2	1	4	0	0	0

Code unité	Nom	Ville	DS princ.	Sect. princ.	Chim. Polym. & Matière molle	Matér. Syst. Fonction	Phys. & Phys-Chimie	Surfaces Interf.	Phys. & Biol.	Théorie Simul.
UMR7568	Laboratoire de chimie-physique macromoléculaire (LCPM)	Nancy	Chimie	11	3	2	4	2	0	0
UMR7574	Chimie de la Matière Condensée de Paris	Paris	Chimie	15	0	1	1	0	2	0
UMR7581	Laboratoire de recherches sur les polymères (LRP)	Thiais	Chimie	11	4	3	2	0	0	0
UMR7610	Chimie des polymères	Paris	Chimie	11	5	0	0	0	0	0
UMR7612	Liquides Ioniques et Interfaces Chargées (LI2C)	Paris	Chimie	13	1	1	4	0	2	0
UMR7615	Physicochimie des polymères et des milieux dispersés	Paris	Chimie	11	0	0	5	0	0	0
UMR8008	Laboratoire de structures et propriétés de l'état solide (LSPES)	Lille	Chimie	11	0	5	0	0	0	0
UMR8009	Chimie organique et macromoléculaire	Lille	Chimie	12	0	4	1	1	0	0
UMR8612	Physico-chimie pharmacotechnie biopharmacie	Chatenay	Chimie	16	2	0	4	1	0	0
FREZ485	Laboratoire de physico-chimie des interfaces et applications (LPCIA)	Lens	Chimie	11	?					
FREZ771	Rhodia Laboratoire du Futur	Bordeaux	Chimie	11	0	1	3	0	0	0
UPR1929	Biologie cellulaire et moléculaire de la sécrétion	Paris	SDV	23	0	0	0	0	1	0
UMR5091	Physiologie cellulaire de la synapse	Bordeaux	SDV	24	0	0	0	0	3	0
UMR7099	Physico-chimie moléculaire des membranes biologiques	Paris	SDV	23	0	0	0	0	4	0

Code unité	Nom	Ville	DS princ.	Sect. princ.	Chim. Polym. & Matière molle	Matér. Syst. Fonction	Phys. & Phys-Chimie	Surfaces Interf.	Phys. & Biol.	Théorie Simul.
UMR8544	Laboratoire de neurobiologie	Paris	SDV	24	0	0	0	0	2	0
FRE2930	Laboratoire d'enzymologie et biochimie structurales (LEBS)	Gif/Yvette	SDV	21	0	0	0	0	2	0
FRE2963	Institut de recherche interdisciplinaire (IR)	Lille	SDV	11	0	0	0	0	2	0
UMR5510	Groupe d'études de métallurgie physique et de physique des matériaux (GEMPPM)	Lyon	Ing	9	0	1	3	3	0	1
UMR5520	Laboratoire de rhéologie	Grenoble	Ing	10	0	2	0	2	0	0
UMR7052	Biomécanique et biomatériaux ostéo-articulaires	Paris	Ing	30	2	2	0	2	0	0
UMR7057	Matière et systèmes complexes (MSC)	Paris	Ing	10	1	2	3	3	4	2
UMR7635	Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF)	Sophia	Ing	9	0	4	?	3	0	0
UPR7251	Centre de recherche de la matière condensée et des nanosciences (CRM-CN)	Marseille	MPPU	5	0	0	0	0	2	0
UMR12	Laboratoire Léon Brillouin (LLB)	Gif/Yvette	MPPU	5	0	0	4	2	1	1
UMR5587	Laboratoire des colloïdes, verres et nanomatériaux (LCVN)	Montpellier	MPPU	5	1	0	5	1	1	2
UMR5588	Laboratoire de spectrométrie physique (LSP)	Grenoble	MPPU	5	1	1	5	2	5	3
UMR5672	Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon	Lyon	MPPU	2	0	2	4	2	?	4
UMR5819	Structures et propriétés d'architectures moléculaires (SPRAM)	Grenoble	MPPU	11	0	5	2	1	2	3

Code unité	Nom	Ville	DS princ.	Sect. princ.	Chim. Polym. & Matière molle	Matér. Syst. Fonction	Phys. & Phys-Chimie	Surfaces Interf.	Phys. & Biol.	Théorie Simul.
UMR6212	Adhésion et inflammation	Marseille	MPPU	11	0	0	0	0	4	0
UMR6626	Groupe matière condensée et matériaux (GMC/M)	Rennes	MPPU	5	0	0	2	0	5	0
UMR7504	Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS)	Strasbourg	MPPU	6	2	2	1	2	2	1
UMR7556	Laboratoire de physique des matériaux	Nancy	MPPU	6						
UMR7642	Laboratoire des solides irradiés (LSI)	Palaiseau	MPPU	5	0	2	0	0	0	0
UMR8024	Laboratoire de dynamique et structures des matériaux moléculaires (LDSMM)	Lille	MPPU	11	0	4	0	0	0	0
UMR8502	Laboratoire de physique des solides	Orsay	MPPU	6	1	3	4	4	3	4
UMR8550	Laboratoire de physique statistique de l'ENS (LPS)	Paris	MPPU	2	0	0	4	0	5	3

Ce tableau a été établi à partir des réponses des directeurs d'unités qui ont été interrogés sur le nombre de chercheurs, enseignants-chercheurs, IFA, chercheurs post-doctoraux et doctorants, qui participaient aux six thématiques choisies pour décrire les activités de recherches de la section 11. Les chiffres indiqués dans les colonnes traduisent l'intensité des moyens affectés à ces recherches (0 : inexistant à 5 très fort).

issues de la physique et de la physicochimie des systèmes macromoléculaires complexes et de la biologie structurale et fonctionnelle. Les avancées se heurtent, entre autres, à l'extrême complexité des analyses structurales, aux difficultés actuelles de bien maîtriser et contrôler les voies de biosynthèses, ainsi qu'au caractère poly-électrolytique, très souvent marqué, de ces macromolécules.

Les méthodes de modifications chimiques (et enzymatiques) sont appliquées avec succès, même si elles se heurtent au caractère poly-fonctionnel de ces macromolécules et aux difficultés de caractérisations structurales. Elles sont mises en œuvre sur des macromolécules accessibles au travers de différents procédés d'extractions physiques, et permettent d'accroître la palette de structures disponibles, ouvrant de ce fait de nouvelles explorations, en particulier dans le domaine des systèmes auto-associatifs. La mise en œuvre de ces biopolymères dans le domaine des matériaux va des fluides complexes aux solides, en passant par les gels physiques ou chimiques, et les colloïdes. L'association de polysaccharides naturels avec des polymères de synthèse est également un domaine à développer pour une meilleure compréhension des phénomènes d'interface et pour l'élaboration de matériaux composites à propriétés nouvelles : elle doit intégrer tous les aspects chimiques et physicochimiques de compatibilisation entre les deux espèces.

Certains polysaccharides sont biosynthésés et bioassemblés sous forme de monocristaux très allongés (largeur de 2 à 50 nm pour une longueur excédant souvent le micron), dans lesquels les chaînes de polymères sont orientées selon le grand axe des cristallites. Objets anisotropes, noncentrosymétriques, et de très hauts modules mécaniques, ces nanomatériaux offrent de nouveaux champs d'investigation au niveau des dispersions, auxquelles ils donnent lieu dans des solvants différents, de leurs capacités à s'auto-associer en assemblage de type cristal liquide, voire de nouvelles mises en œuvre pour obtenir des matériaux bio-mimétiques. Ces travaux n'excluent en aucun cas, des modifications chimi-

ques en phase hétérogène, qui permettent une meilleure compatibilisation avec des solvants ou matrices environnantes.

4 - PHYSIQUE ET PHYSICO-CHIMIE (FORMULATION DE LA MATIÈRE MOLLE)

La recherche en physique et physicochimie de la « matière molle » vise essentiellement à comprendre l'organisation statique et dynamique d'assemblages supramoléculaires formant les fluides complexes sur des échelles spatiales et temporelles les plus étendues possibles. Cette démarche doit permettre d'élaborer de nouveaux systèmes (par synthèse et/ou formulation), de dégager des relations structures/comportements macroscopiques et de conduire ainsi à des applications. Il s'agit d'une recherche très pluridisciplinaire qui irrigue de nombreux domaines connexes (interface physique/biologie, par exemple) et qui concerne de très nombreux secteurs industriels (pétrole, pharmacie, cosmétique, agro-alimentaire, détergents, etc.). Les objets de ces études sont principalement les polymères en solution et à l'état fondu, les composés amphiphiles, les cristaux liquides et les milieux dispersés et colloïdaux. Ce champ d'activité existe depuis plus d'un siècle mais présente un développement plus rapide depuis les années 1970 grâce notamment à l'impulsion des travaux théoriques de l'école de de Gennes, au développement des grands instruments et à la richesse toujours croissante des applications industrielles. La création de la section 15 (devenue section 11 en 2004) au début des années 1990 en est le reflet. Ainsi, des bases expérimentales et théoriques solides ont été jetées pour tout ce qui concerne les aspects « statiques » (structures, textures, forces intermoléculaires et interparticulaires, diagrammes de phases, etc.) de systèmes relativement simples (composants de même nature et en nombre réduit, à l'équilibre thermodynamique, etc.).

4.1 LES MÉTHODES D'ÉTUDES

Par rapport à ce constat, un certain nombre d'avancées globales plus récentes méritent d'être mentionnées ici. Des systèmes nettement plus complexes, de par le nombre et la nature de leurs constituants, leur concentration, leur confinement, leur caractère stimuable, sont à présent abordés avec succès. De nombreuses équipes de recherche étudient les aspects « dynamiques » en relation avec les propriétés structurales, développant ainsi la rhéophysique de ces systèmes. L'apparition des techniques de « micro fluidique » et même de « nano fluidique » - mise en œuvre des fluides confinés à l'échelle micronique (nanométrique)-, appliquées aux fluides complexes est en plein essor. Ces techniques ont des perspectives applicatives nombreuses et ont conduit, par exemple, à la création d'une unité mixte en partenariat avec Rhodia. En parallèle, l'instrumentation (grands instruments et techniques de laboratoire) s'est particulièrement améliorée dans les domaines de l'imagerie et de la diffusion des rayonnements (micro-diffraction, temps-résolu) ainsi que par la mise en œuvre d'environnements d'échantillons originaux et performants (tels que les dispositifs d'échantillon à gradient de composition pour l'étude rapide de la structure de systèmes multiphasiques par SAXS). La communauté s'est structurée autour de plusieurs grands centres et de nombreuses équipes de taille plus modeste, qui sont, et on ne peut que le regretter, beaucoup moins fédérés par des GDRs nationaux que par le passé. Le caractère très pluridisciplinaire de cette thématique constitue bien sûr une richesse mais il présente également souvent un handicap en ce qui concerne l'enseignement et le recrutement d'étudiants.

Les systèmes macromoléculaires et auto-associatifs concernent plus de 25% des chercheurs de la section. Leur intérêt se tourne actuellement vers les assemblages de systèmes complexes, multi-composants (polymères + tensio-actifs, polymères + colloïdes, tensio-actifs anioniques + cationiques, thermotropes + lyotropes, etc.). La synthèse macromoléculaire,

de mieux en mieux contrôlée, fournit des macromolécules composites dont l'organisation, en solution ou en fondu, est parfois hiérarchique, voire même mésomorphe à certaines échelles (copolymères à blocs cristaux liquides), et des polyélectrolytes complexes qui sont l'objet de nombreuses investigations mais dont la compréhension reste un défi d'actualité. Les phénomènes de gélification attirent également l'attention des chercheurs dans ce contexte. Cette thématique trouve un prolongement naturel vers l'interface physique/biologie dans les études des systèmes ADN/tensioactifs examinés en vue de la thérapie génique et dans celles des systèmes polymères/protéines en vue de la cristallisation de protéines membranaires. Les applications industrielles des systèmes à base d'amphiphiles posent toujours de nouvelles questions, en particulier sous l'angle de leur formulation pour obtenir simultanément plusieurs propriétés a priori contradictoires (propriétés rhéologiques et de mouillage des shampooings et des peintures, par exemple). Ce champ de recherche est également abordé dans des situations bidimensionnelles, sous forme de films (couches de Langmuir, dépôt « layer by layer », mousses, etc.). Les principales difficultés proviennent de la compréhension encore trop incomplète des interactions électrostatiques en solution aqueuse.

4.2 LES CRISTAUX LIQUIDES

Le domaine des cristaux liquides thermotropes se renouvelle actuellement dans plusieurs directions au niveau international. La synthèse de molécules mésogènes vise le plus souvent soit à l'obtention de composés mésogènes « coudés » dont le polymorphisme est riche et novateur soit à exploiter les associations supramoléculaires pour produire de grands édifices très complexes qui s'organisent parfois avec des périodes de l'ordre de la dizaine de nanomètres, voire plus. De manière plus générale, la synthèse de nouveaux cristaux liquides thermotropes n'est plus représentée que dans quelques centres ; il y a là un appauvrissement qui contraste avec la situation

internationale. Néanmoins, les récents développements synthétiques en direction de systèmes et de phases de plus en plus complexes, en France comme à l'étranger, entraînent un certain renouvellement des techniques d'étude structurale (diffusion anormale des rayons X, reconstitution de cartes de densité électronique, etc.). L'expression de la chiralité moléculaire au niveau macroscopique, par l'apparition de mésophase cholestérique par exemple, est une question fondamentale encore mystérieuse qui suscite de plus en plus de travaux. Les élastomères cristaux-liquides présentent un intérêt croissant car ils combinent l'élasticité des réseaux polymères avec des propriétés électriques et optiques. D'un point de vue théorique, ils fournissent également des problématiques originales. Dans des architectures sophistiquées, ils peuvent être utilisés pour élaborer des muscles artificiels, mais les temps de réponse restent encore trop longs et le rendement trop faible pour des applications. Le dopage de phases nématiques par des nanoparticules minérales conduit à de nouveaux systèmes présentant de meilleures propriétés optiques et magnétiques. Le domaine d'application privilégié des cristaux liquides thermotropes reste évidemment celui de l'affichage. Ceci nécessite un contrôle de plus en plus fin de leurs propriétés interfaciales et de leurs défauts, une activité assez bien représentée dans notre communauté. En revanche, d'autres dispositifs électro-optiques incorporant des cristaux liquides (OFETs, OLEDs, stockage optique de data, matériaux photoniques, etc.) se développent actuellement rapidement dans l'industrie et force est de constater un décalage croissant entre ces activités d'ingénierie et les compétences couvertes actuellement par les unités relevant de la section.

4.3 LES MATÉRIAUX COLLOÏDAUX

La section 11 concerne également le vaste domaine des colloïdes dans lequel la France possède une grande tradition de recherche.

Les dispersions colloïdales peuvent être très fluides (suspensions diluées de particules, de micelles ou de vésicules, émulsions) ou, au contraire, très pâteuses dans les systèmes dits « encombrés » dont la rhéophysique est actuellement en fort développement en France comme à l'étranger. Les problèmes en suspens, comme l'influence de la polydispersité, les effets d'anisotropie, les effets de spécificité ionique, la sédimentation et l'électrophorèse de suspensions concentrées, relèvent de traitements délicats d'un point de vue théorique et nécessitent la mise en œuvre d'instrumentations sophistiquées. Par ailleurs, l'expansion rapide, à l'échelle mondiale, de la « chimie douce » (c'est-à-dire une chimie minérale en solution et à relativement basse température, dérivée des procédés sol/gel de polycondensation inorganique), représentée notamment en section 15 du Comité National conduit à des rapprochements féconds qui avaient en France été initiés avec succès par le GDR FORMES. C'est le cas par exemple de l'apparition des solides mésoporeux en vue d'applications dans les domaines de la catalyse et de la filtration. C'est aussi le cas des systèmes hybrides organiques/inorganiques (nanoparticules/tensio-actifs), des matériaux composites comme les systèmes polymères/argiles utilisés dans l'industrie automobile et des bio-colloïdes développés pour l'imagerie médicale et la vectorisation de principes actifs. Le thème de la biominéralisation se rattache également à ce courant. Les nanotubes de carbone dont la dispersion sous forme individuelle reste un défi majeur sont de plus en plus employés dans diverses formulations faisant intervenir par exemple des polymères usuels (filage des nanotubes) ou des amphiphiles en vue de leur solubilisation. Les propriétés exceptionnelles de tels matériaux assureront probablement la croissance rapide de ce champ de recherche encore plusieurs années.

Comme il est déjà apparu plus haut, la rhéophysique est une sous-discipline qui connaît depuis quelques années une forte expansion et qui concerne des systèmes expérimentaux très variés. Comparée au contexte international, la communauté française maintient une position très solide, tant du point de

vue théorique qu'expérimental. Les questions en suspens touchent surtout aux comportements non-linéaires qui conduisent à des instabilités élastiques, des fractures fluides autoréparantes, des transitions sous-cisaillement, des écoulements instationnaires et finalement au « rhéo-chaos ». L'évolution rapide de la microfluidique soulève naturellement la question du comportement rhéophysique de fluides complexes en situation de confinement. Les problématiques voisines de dynamique lente et de vieillissement des systèmes encombrés, dans lesquels les fluctuations ne sont pas forcément de nature thermodynamique, attirent actuellement un grand engouement international où la France est bien représentée. Ceci est dû aux avancées rendues possibles par de nouvelles approches théoriques et de nouvelles techniques instrumentales de diffusion des rayonnements (DWS et XPCS). Cette problématique des verres colloïdaux a enrichi, en la renouvelant celle des verres durs ; elle a naturellement débordé largement le cadre de notre communauté en intéressant en particulier nos collègues de la section 5.

Pour terminer, l'étude de systèmes de plus en plus complexes d'une part et le développement massif de la puissance de calcul des ordinateurs d'autre part conduisent au développement grandissant des simulations numériques aux échelles mésoscopiques, comme technique alternative aux expériences et à la théorie en matière molle. Elle deviendra de plus en plus incontournable scientifiquement. Si la simulation numérique en matière molle est de niveau excellent en France, elle demeure quantitativement sous-critique. Elle est largement dominée en Europe par l'École allemande initiée par K. Binder. Un effort important de recrutement et/ou un encouragement à la conversion thématique de chercheurs en simulation issus de la physique de la matière condensée « dure » devraient être menés.

5 – SURFACES ET INTERFACES

Les recherches consacrées aux surfaces et aux interfaces, à leur élaboration, à leurs propriétés et à leurs comportements, sont extrêmement nombreuses et variées. Pour se convaincre de cette effervescence, il suffit de parcourir des revues scientifiques généralistes pour constater qu'une proportion importante d'articles traite de ces sujets et ce, dans différentes disciplines allant de la chimie à la physique, en passant par la biologie et l'ingénierie. Bien que fluctuant d'une thématique à une autre, ce dynamisme est soutenu depuis plusieurs années voire décennies. C'est le cas en science des matériaux et plus particulièrement en ce qui concerne la matière molle où les systèmes supra et macromoléculaires offrent beaucoup de possibilités d'étude. Les concepts et les outils théoriques pour appréhender des problématiques spécifiques aux interfaces, lorsque celles-ci sont relativement simples, sont plutôt bien maîtrisés, qu'ils relèvent de la thermodynamique, de la mécanique, de la rhéologie ou de l'hydrodynamique. De même, de nombreuses techniques expérimentales se sont développées ou adaptées afin de créer, de modifier, de manipuler ou de caractériser des surfaces, solides ou liquides dans différents environnements.

Aujourd'hui, le cadre conceptuel et technique est plutôt mature permettant ainsi de s'intéresser à des systèmes de plus en plus complexes mettant en jeu par exemple des matériaux aux propriétés non-triviales (fluides viscoélastiques), des matériaux composites (l'interface intègre plusieurs constituants), des matériaux hétérogènes (hétérogénéité chimique ou rugosité contrôlée), des matériaux réactifs (stimulables par leur environnement ou par un champ extérieur) ou des systèmes actifs (systèmes biologiques hors de l'équilibre thermodynamique qui ont une activité fonctionnelle influençant les propriétés interfaciales). Ces recherches fondamentales sur des systèmes de plus grande complexité trouvent un écho évident dans de très nombreuses

applications, qu'elles soient naturelles, inspirées par exemple de la biologie, qu'elles soient courantes en agro-alimentaire, cosmétique ou mécanique ou qu'elles soient beaucoup plus high-tech comme en réclament l'électronique, l'électro-optique, l'électromécanique ou le biomédical. Ces applications nécessitent des surfaces ou des films interfaciaux apportant une ou plusieurs fonctionnalités. À titre indicatif on peut en citer quelques unes, comme la réactivité ou la compatibilité chimique, l'adhésion, la lubrification, le mouillage, le renfort mécanique ou rhéologique, la sélectivité dans la perméabilité, la capture ou la protection, l'ancrage pour induire un ordre local ou encore la sélectivité optique.

Pour obtenir des surfaces avec de telles propriétés, beaucoup d'efforts sont consacrés à leur élaboration, en améliorant ou en diversifiant les procédés. Ceux-ci peuvent être chimiques, par exemple par fonctionnalisation, greffage, polymérisation locale ou croissance cristalline. Il existe également différentes techniques physico-chimiques, par exemple par adsorption, électrodéposition, traitement plasma, photogravure ou spin-coating. Mais également des procédés physiques, par exemple par jet moléculaire, ablation laser, dépôt par évaporation, magnétron ou encore gravure par bombardement de particules. Beaucoup de ces techniques de modification de surfaces demandent un savoir-faire conséquent qui relève plus de l'expertise que de la routine. Avoir la compétence de plusieurs de ces techniques au sein d'une même équipe ou même à l'intérieur d'un institut n'est pas courant.

De fortes compétences sont également souvent nécessaires pour la caractérisation. Il faut distinguer deux types de caractérisation. La première concerne la surface, l'interface ou la couche superficielle en tant que telle, pour en déterminer sa composition, sa structure ou encore sa morphologie. Les techniques de choix sont les différentes spectroscopies, adaptées pour les surfaces, (Auger, de masse, photoélectrons, fluorescence, RX, neutron, etc.), les techniques d'imagerie par microscopie (optique, électronique, ionique, à champ proche, etc.) ou encore les techniques méca-

niques (indentation, profilométrie, etc.). Le second type de caractérisation concerne les propriétés des surfaces, les fonctionnalités visées par l'élaboration ou la modification. Dans le cadre d'une recherche fondamentale, bien souvent cette caractérisation de propriété suppose le développement d'une instrumentation spécifique. Comme pour l'élaboration des surfaces, on retrouve généralement une forte spécialisation des équipes de recherche sur un type de fonctionnalité et peu de diversité même à l'échelle d'un institut.

Les développements technologiques font que la tendance de ces dernières années est à la caractérisation aux échelles micro et nanométriques. Le leitmotiv est une approche multi-échelle des phénomènes pour une compréhension globale. Cette motivation est légitime, car bien souvent, une surface, une interface, une couche interfaciale peut avoir différentes tailles caractéristiques ; moléculaire mais aussi supramoléculaire due aux inhomogénéités ou aux réseaux de défauts, et bien sur micro ou millimétrique par leur rugosité intrinsèque ou leur texturation. De nouveau on constate une spécialisation des équipes expérimentales. Bien souvent elles se limitent à une seule échelle d'étude. Peu d'équipes ont réellement une approche multi-échelle avec différents montages complémentaires pour couvrir une large gamme.

Comme nous l'avons déjà souligné, la recherche consacrée aux surfaces et aux interfaces s'autoalimente par les besoins d'innovation technologique dans de très nombreux champs d'application. L'essor actuel des nanotechnologies ne peut que renforcer cette très forte demande. En miniaturisant les dispositifs, la proportion de surface devient de plus en plus importante nécessitant souvent de nouvelles solutions technologiques à un problème. Lubrifier et refroidir un MEM ne se fera pas avec une huile.

Ce champ de recherche est très actif mais aussi très concurrentiel. Afin d'être compétitives, les recherches doivent s'appuyer à la fois sur de l'originalité et des compétences pointues. Elles réclament également une chaîne de compétences bien souvent pluridisciplinaire.

res (chimie, physique, ingénierie et biologie) à la fois pour l'élaboration et la caractérisation. Les systèmes supra et macromoléculaires sont des matériaux de choix pour se livrer à de telles études. Ils sont extrêmement variés dans leur forme et offrent beaucoup de possibilités dans leurs propriétés. La communauté française de la matière molle s'intéresse depuis toujours à ces problématiques d'interfaces, de surfaces, de membranes ou de couches interfaciales. C'est par tradition une de ses préoccupations qui lui a valu des contributions majeures et des leaderships par exemple sur le mouillage, les mésophases de membranes ou encore les émulsions. Sa culture sur ces sujets est forte. Cette communauté nationale est morcelée, très dispersée. La plupart des laboratoires ayant une activité notable sur les systèmes supra ou macromoléculaires ont généralement au moins une équipe travaillant sur des problématiques d'interfaces. À une ou deux exceptions près (seul l'ICSI?), aucun de ces instituts n'affiche cependant cette thématique comme son axe principal de recherche. Aussi réunir sur un même site, même géographique, la chaîne pluridisciplinaire de compétences permettant de faire de l'élaboration originale et de la caractérisation fine n'est pas usuel. De plus, la communauté française souffre globalement d'un déséquilibre de compétences. Si elle possède plusieurs équipes de très bon niveau international de caractérisation ou de modélisation, elle est beaucoup moins riche en équipes et en chercheurs pouvant élaborer des systèmes originaux. Ils forment une espèce rare, recherchés et sollicités par leurs collègues physico-chimistes ou physiciens. Ce constat est également généralisable à l'échelle internationale. Il y a certainement plus besoin actuellement de recruter des chimistes, des physico-chimistes ou biologistes élaborateurs ou formulateurs de nouveaux systèmes et de préférence dans un environnement proche des équipes de caractérisation.

6 – INTERFACE PHYSIQUE-BIOLOGIE

6.1 INTERFACE PHYSIQUE/VIVANT

L'interface entre la physique et les sciences du vivant a connu un essor très important ces dernières années au niveau international et national. Elle se situe à la frontière entre la physique, la chimie, et différentes branches des sciences du vivant : la biologie cellulaire, plus récemment la biologie systémique, la biologie du développement ainsi que la santé. Ce domaine nécessite une approche multidisciplinaire, qui a été soutenue par un effort pour accroître le nombre de chercheurs d'autres domaines dans les laboratoires (physiciens en biologie, ou biologistes en physique). On peut observer que l'interpénétration des communautés de physiciens et de biologistes s'est ainsi améliorée dans certains laboratoires, mais reste encore réduite globalement. On observe aussi un engouement parmi les meilleurs étudiants pour cette discipline ainsi qu'une forte pression au niveau des candidatures CR. Notons que les domaines de cette interface sont en partie aussi couverts par la section 5 avec des thèmes très semblables. Certains thèmes ont continué à se développer, mais de nouveaux sont également apparus. Les thèmes saillants sont résumés dans ce qui suit.

6.2 MESURES À L'ÉCHELLE DE LA MOLÉCULE UNIQUE

Depuis quelques années, les physiciens ont mis au point des expériences très « pointues » permettant de mesurer le comportement de molécules biologiques à l'échelle de la molécule unique à l'aide principalement de pinces optiques ou de pinces magnétiques. Ce type de techniques qui étaient un « tour de force » à peine imaginable au début des années 1990 a permis de mesurer initialement les propriétés mécaniques de certaines biomolécules

(ADN en particulier, mais également des protéines), puis de caractériser les mécanismes d'interaction avec d'autres protéines ou des enzymes (RecA, topo-isomérase, hélicase, polymérase, etc.) avec l'ADN ou l'ARN. La contribution des groupes français est importante dans ce domaine. De la même façon, le détail des mouvements de moteurs linéaires ou rotatifs est progressivement décrypté. Des énergies de rupture entre un ligand unique et son récepteur impliqués dans l'adhésion cellulaire ont pu également être mesurées. Au-delà de la structure moléculaire fournie par les biologistes structuralistes, ces expériences permettent donc d'accéder à la fonction de ces molécules. Cet énorme effort expérimental a été complété utilement par des modèles théoriques fondés sur l'utilisation de la mécanique statistique. De nouvelles molécules peuvent encore être étudiées à l'échelle individuelle (d'autres moteurs, d'autres protéines liées à l'ADN ou ARN et impliquées dans la réplication, la transcription, le fonctionnement du ribosome, etc.) et cette caractérisation est essentielle. Néanmoins, les aspects collectifs mettant en jeu plusieurs molécules commencent à être pris en compte de même que le couplage de ces molécules à d'autres éléments cellulaires (membrane, cytosquelette, etc.), ce qui est nécessaire pour rendre compte des systèmes biologiques.

Au-delà des expériences de manipulation de molécules uniques, on assiste au développement d'expériences *in vivo* sur le suivi du mouvement de molécules uniques dans des membranes plasmiques ou à l'intérieur de cellules. Ces approches de la dynamique cellulaire ont à la fois bénéficié du progrès de la sensibilité des techniques de fluorescence et de la préparation de nanoparticules ou de nanocristaux fonctionnalisés, auxquelles ont contribué les physiciens et les physico-chimistes, mais elles ont en retour accéléré ces améliorations techniques. Ces expériences sont certainement amenées à se multiplier et devraient conduire à des collaborations encore plus étroites entre physiciens, chimistes et biologistes cellulaires.

6.3 PHYSIQUE DE LA CELLULE

La physique de la cellule met en jeu, dans de nombreux cas, des échelles de longueur et de temps qui sont typiquement celles de la matière molle. En conséquence, les concepts d'auto-organisation, de transition thermodynamique, et plus encore dynamique, s'avèrent être des outils conceptuels importants. C'est un domaine de choix pour l'interaction physique/biologie car la réalisation des expériences nécessite une connaissance simultanée et approfondie de la biologie cellulaire, de la physique des milieux condensés et de l'optique. La contribution de la communauté française dans ce domaine tant en théorie qu'en physique expérimentale est très bien reconnue sur le plan international. De nouvelles microscopies comme la microscopie multiphotonique, la microscopie fondée sur le transfert résonant de fluorescence ou sur la corrélation de fluorescence ont ouvert la voie ces dernières années à une approche quantitative de la dynamique cellulaire. Différentes techniques de micromanipulation ont également produit des mesures précieuses sur le comportement mécanique des cellules et sur celui de leur membrane. L'adhésion, la signalisation, le transport intracellulaire, la mitose, la motilité cellulaire, la transduction des signaux sont des exemples de domaines où les interactions entre physicochimie et biologie apporteront beaucoup et ont déjà commencé à produire des résultats nouveaux. L'étude de systèmes plus intégrés et complexes, tels que les systèmes sensoriels a été abordée récemment.

6.4 LES SYSTÈMES BIOMIMÉTIQUES ET RECONSTITUÉS

La réalisation et l'étude de systèmes reconstitués mimant une fonction biologique particulière représentent des outils très complémentaires des études réalisées sur les

systèmes cellulaires, et mènent à une compréhension plus détaillée que par l'étude directe du vivant. Ces systèmes permettent de déterminer quels sont les éléments et les paramètres physiques ou biologiques pertinents, puis de les faire varier de façon contrôlée dans des gammes plus étendues qu'*in vivo*, tout en permettant une analyse quantitative. Une comparaison plus directe avec des modèles théoriques est ainsi facilitée et a été souvent très fructueuse. Citons les exemples des vésicules géantes contenant des pompes à ions actives, la polymérisation d'actine induite à la surface de billes ou de vésicules et mimant le mouvement de la bactérie *Lysteria*, l'adhésion de vésicules contenant des molécules ligands sur des substrats fonctionnalisés par leurs récepteurs, la formation de nanotubes de membranes par des moteurs moléculaires mimant les structures tubulaires impliquées dans le transport intracellulaire etc. Les études se sont attachées à introduire différents aspects hors-équilibre du fonctionnement cellulaire, les interactions cytosquelette/membrane, cytosquelette/membrane/moteurs. D'autres études cherchent à mimer des propriétés d'adhésion dans des situations se rapprochant de celles du vivant. Les mécanismes de la motilité peuvent aussi s'aborder de manière biomimétique. Les conséquences de l'assemblage supramoléculaire de protéines sur les membranes commencent également à être considérées.

Physique des systèmes multicellulaires

Ce domaine est encore peu développé, mais est appelé à un essor rapide. Quelques problèmes importants ont commencé à être abordés par notre communauté : l'organisation et la communication dans des populations de neurones, la morphogénèse et la différenciation dans le développement de l'embryon (en particulier, le rôle de contraintes mécaniques), la morphogénèse de systèmes simples (par exemple, l'hydre). Mais beaucoup reste à faire. Les physiciens de la section 11 peuvent très certainement contribuer à de nouvelles approches dans la biologie du développement. L'étude des tissus cellulaires commence égale-

ment à se mettre en place, soit du point de vue de l'adhésion, du développement, ou de la cicatrisation. Enfin, comprendre l'influence de paramètres extérieurs tels que le confinement, le manque de nourriture, la présence de virus, etc. sur l'évolution d'une colonie bactérienne représente un pas supplémentaire dans l'étude de ces systèmes collectifs. Il est très probable que les approches physique et physico-chimique apporteront une nouvelle manière d'aborder ces différents problèmes.

Systémique : étude des réseaux biologiques

Un des enjeux importants de la physique des systèmes vivants sera d'aller au-delà de la description de composants individuels et d'intégrer différents niveaux d'information pour comprendre le fonctionnement plus global de systèmes biologiques (par exemple, la chimiotaxie chez les bactéries, les circuits de neurones, la reconnaissance immune, le développement embryonnaire, etc.). La systémique (*System Biology*) est un domaine très en pointe actuellement en biologie. Elle se développe également dans les meilleurs laboratoires étrangers de biophysique tant au niveau des expériences que des concepts et outils d'analyse théorique à mettre en place, mais dans un nombre encore très réduit de groupes français. Il s'agit de comprendre et de décrire les circuits de base dans la régulation de la transcription, dans la signalisation, dans la mécano-transduction et dans le développement d'évaluer le rôle du bruit, ou alternativement la robustesse de ces réseaux. Un système relativement simple semble être un bon point de départ : les horloges biologiques. Ce domaine est donc clairement appelé à se développer dans les prochaines années, mais cela nécessitera une nouvelle évolution de la communauté des physiciens issus de la matière molle, car il faudra s'adapter à d'autres outils expérimentaux et conceptuels.

6.5 BIOTECHNOLOGIE, GÉNOMIQUE ET PROTÉOMIQUE

Notre communauté peut intervenir à plusieurs niveaux dans la biotechnologie. Grâce à son savoir acquis dans le domaine du greffage des molécules aux interfaces, elle a contribué activement à la réalisation de « biochips » dont le succès en biologie et en médecine a été très rapide, mais qui sont encore en plein développement. Notre culture en physicochimie colloïdale/matière molle permet également d'aborder la conception et la réalisation de nouveaux procédés utilisables en génomique, en protéomique, en séparation et diagnostique cellulaire. Il y a là une carte importante à jouer. Les nano- et microtechnologies, en particulier dans le domaine de la microfluidique, sont appelées à jouer un grand rôle à l'interface physicochimie/biologie. On peut ainsi envisager de pouvoir contrôler complètement l'environnement d'une cellule unique à la fois grâce à une fonctionnalisation de la surface contrôlée spatialement à l'échelle de la taille cellulaire grâce à la micro-lithographie et à un apport contrôlé de substances grâce à la microfluidique. Les laboratoires sur puces sont un exemple des applications technologiques auxquelles des groupes de notre communauté ont contribué. Pour l'instant, les analyses génomiques ont été laissées en grande partie aux mathématiciens : la physique statistique commence à s'intéresser au sujet et est susceptible d'apporter un éclairage nouveau. Les études sur le repliement des protéines devraient ouvrir le champ d'investigation aux fonctions de ces protéines.

Systèmes pour l'Innovation thérapeutique

La délivrance spécifique au niveau cellulaire de substances actives, agents de diagnostic ou médicaments, vers un organe ou un tissu biologique donné, représente aujourd'hui un défi majeur pour le dépistage et le traitement de maladies humaines graves d'origine infec-

teuse, cancéreuse ou génétique. Depuis quelques années, un certain nombre d'équipes relevant de la section 11 mais aussi d'autres sections (notamment les sections 5 et 16) développent des études à la frontière entre physicochimie de la matière molle et biologie dont l'objectif est de répondre à une attente de systèmes performants pour l'imagerie médicale *in vivo* ou la vectorisation de principes actifs thérapeutiques. Les caractéristiques structurales et les dimensions de ces systèmes doivent être compatibles avec celles du vivant et obligatoirement permettre le passage des barrières biologiques que sont les membranes cellulaires, ce qui, sans ambiguïté, relève du domaine des nanotechnologies. D'une façon corollaire, on remarque un intérêt florissant pour la modélisation des interfaces biologiques. Le but est ici de tester puis de comprendre les interactions de molécules ou de colloïdes possédant une fonction biologique, soit pour en dégager les paramètres mécanistiques, soit pour mettre au point des systèmes vecteurs de biomolécules. L'ensemble de ces thématiques fait appel à des disciplines majeures de la section 11 comme l'ingénierie macromoléculaire, la physico-chimie des lipides et amphiphiles ou la chimie des colloïdes métalliques ou organométalliques, mais s'ouvrent également sur d'autres secteurs de la recherche puisque les enjeux appartiennent au domaine biomédical : techniques d'imagerie, biochimie, biologie cellulaire ou animale, pharmacotechnie. La diversité des sujets et des systèmes étudiés est remarquable. Certains s'inscrivent dans la continuité du quadriennal précédent : structure et dynamique de molécules biologiques, protéines ou ADN, insérées dans des phases d'amphiphiles lyotropes lamellaires ou cubiques (confinement d'enzymes, libération contrôlée de biomolécules, vecteurs efficaces pour la transfection, nucléosomes), systèmes mixtes lipides/tensioactifs (modèles de membrane, formation de pores membranaires, transition micelle-vésicule, reconstitution de protéines membranaires), colloïdes pour la vectorisation (émulsions, liposomes, nanosphères et nanocapsules de polymères, polymères associatifs, dendrimères, colloïdes magnétiques) ou pour l'imagerie (nanoparti-

cules métalliques ou organométalliques, nanocristaux d'oxydes de métaux de transition ou de semi-conducteurs). Parallèlement, on note l'essor de systèmes hybrides plus complexes associant polymères et lipides ou particules métalliques, ou encore dérivés métalliques et lipides (latex biocompatibles, liposomes furtifs, magnéto-liposomes, lipoparticules). Un effort remarquable émerge dans le domaine de la fonctionnalisation de surface chimique et/ou biochimique de nano-objets pour les rendre compatibles avec les milieux biologiques et adressables à un tissu-cible ou une cellule-cible : nanotubes de carbone modifiés pour le transport de principes actifs, nanoparticules métalliques ou nanocristaux d'oxyde de fer pour l'imagerie, les traitements par hyperthermie ou la vectorisation magnétique de médicaments, quantum dots ou nano-sondes de fluorescence. On voit également se développer une chimie originale pour la synthèse de nouveaux dérivés amphiphiles capables de s'auto-assembler et dotés d'une activité biologique propre (par exemple reconnaissance cellulaire, activité antibactérienne ou antivirale) conduisant ainsi à des systèmes biomimétiques polyfonctionnels. Se constitue ainsi progressivement un vivier interdisciplinaire propice à l'innovation thérapeutique.

Interface Physique/biologie végétale

Sous forme de graines, tubercules ou tiges, les organes végétaux sont le siège d'assemblages de milliers voire de dizaines de milliers de molécules et macromolécules différentes. Ces assemblages résultent de programmations génétiques spatio-temporelles et de mécanismes d'auto-organisation, qui conduisent à la formation de systèmes organisés aussi complexes qu'une paroi végétale, un grain d'amidon, un corpuscule protéique ou un tégument. Le développement des techniques analytiques a permis la caractérisation précise de la composition chimique fine de ces systèmes de macromolécules végétales ; ceci ne permet toutefois pas d'appréhender une fonction biologique, une propriété fonctionnelle voire une opération technologique.

Les caractérisations des interactions à caractère fonctionnel doivent être développées, ainsi que la compréhension et la modélisation de ces structures et/ou mécanismes de l'échelle moléculaire à l'échelle supramoléculaire. L'ambition est de ne pas restreindre le cadre du travail qui doit permettre de comprendre et de modéliser les structures, les interactions moléculaires et macromoléculaires, leurs assemblages et leurs dynamiques, dans des environnements aussi variés que les solutions, les interfaces ou les phases condensées. En complément des approches qui relèvent classiquement de l'étude des systèmes moléculaires organisés, il est désormais possible d'intégrer l'ensemble des outils qu'offrent les avancées de la biologie, tant au niveau de la perturbation des fonctions biologiques par des modifications moléculaires à l'aide des outils de la biologie moléculaire, qu'au travers des modifications de l'expression et de la régulation du génome. Une communauté scientifique comprenant des chercheurs INRA et CNRS est en train de se constituer autour de cette thématique très originale sur la scène internationale.

Les lipides naturels : préoccupation fondamentales et finalisées

Les lipides naturels et leurs dérivés sont largement utilisés dans les formulations de produits pharmaceutiques et cosmétiques et touchent par essence la mise en œuvre des produits agroalimentaires. Leur aptitude à former des auto-assemblages et créer des interfaces (compartmentation) les rend capables de structurer les matériaux dans lesquels ils sont incorporés. L'étude de l'infinie variété des structures formées par ces molécules qu'elles soient d'origine animale ou végétale ou encore synthétique fait directement partie des préoccupations de la section 11. En tentant de comprendre et d'influer sur l'organisation de ces biomatériaux, il s'agit de répondre à des besoins précis des différentes industries impliquées et de préparer leurs évolutions futures ainsi que celles de nos sociétés. À cet égard, la cristallisation en émulsion dans les produits laitiers, la stabilisation des mousses alimentai-

res (ex. crème glacée) ou cosmétiques par la structuration de mésophases, la nanoencapsulation de principes actifs (médicaments, vitamines, arômes, etc.) sont des exemples de recherches pour lesquels un lien fort avec la recherche fondamentale sur des systèmes modèles et l'utilisation des grands instruments (SAXS, SANS) est indispensable. Notons aussi que la recherche de moyens efficaces de réduction des risques de maladies cardiovasculaires par une modification de la consommation des lipides selon les recommandations des nutritionnistes devrait mobiliser de plus en plus d'équipes et de moyens.

7 – THÉORIE ET SIMULATION

La théorie et la simulation en matière molle diffèrent assez fortement de leurs homologues dans d'autres disciplines: Physique Statistique, Chimie Théorique (Quantique, Réactivités, méthodes mixtes, etc.) Sciences du Vivant (modélisation moléculaires et assemblages de biomolécules, etc.). Outre les objets d'étude, ces différences tiennent aux méthodes mises en œuvre et au niveau de description des systèmes étudiés.

7.1 SINGULARITÉ DE LA THÉORIE ET DE LA SIMULATION EN MATIÈRE MOLLE PAR RAPPORT À D'AUTRES DOMAINES

Le paysage théorique français en matière molle est marqué par Pierre-Gilles de Gennes. Dans le domaine des polymères neutres d'abord, puis dans plusieurs autres domaines de la matière molle, l'emploi des lois d'échelles s'est accru. Il se justifie dans les situations où un phénomène physique pilote le comportement du système à des échelles spatiales comprises entre deux tailles caractéristiques du système. Leur emploi a fortement influencé les appro-

ches théoriques de physique de la matière molle ainsi que, dans une moindre mesure, les méthodes de simulation.

La simulation en matière molle est ainsi souvent une méthode classique (dynamique moléculaire ou Monte Carlo) appliquée à une description mathématique simplifiée des mécanismes sous-jacents (qui, eux, relèvent spécifiquement de la matière molle: déformation des objets, interactions entre objets).

Plus généralement, autant pour la théorie que pour la simulation, les méthodes employées en matière molle se singularisent par le fait que l'objet d'étude est complexe et fait intervenir des échelles spatiales et/ou des phénomènes intermédiaires entre l'échelle atomique et l'échelle macroscopique, et que par conséquent le choix de l'échelle pertinente de description est crucial, ainsi que l'articulation entre plusieurs échelles lorsque c'est utile et possible (approches multi-échelles).

Notons une autre singularité de la théorie et de la simulation dans le domaine de la matière molle: l'interaction avec les expériences est fréquente et l'intérêt réciproque est soutenu. De nombreux expérimentateurs élaborent leurs propres modèles, souvent avec l'outil des lois d'échelle. Il s'agit donc d'un tissu continu de compétences entre expérience et théorie.

7.2 THÈMES MAJEURS DE LA MATIÈRE MOLLE DANS LESQUELS LA THÉORIE ET/OU LA SIMULATION JOUENT UN RÔLE IMPORTANT

Polymères

Deux types de méthodes théoriques se sont développées en France pour décrire les polymères neutres: la lignée Flory/Semenov/Milner-Witten-Cates (méthodes de physique statistique et champs auto-cohérents) et la lignée de Gennes-Pincus (lois d'échelles). Les

apports déjà anciens et qui sont largement utilisés aujourd'hui dans la communauté concernent les polymères neutres greffés ou adsorbés aux interfaces, avec notamment tout le champ des interactions colloïdales (actuellement plus activement sur les polyélectrolytes aux interfaces), mais également le domaine du mouillage, celui de la friction (tribologie, nanotribologie), celui de l'adhésion (renforcement par interpénétration). Dans le domaine des polymères neutres en volume, après des contributions françaises séminales sur les copolymères diblocs, des travaux de simulation sont menés actuellement sur des architectures moléculaires originales (copolymères multiblocs, copolymères en peigne ou en étoile, polymères en anneau, etc.) en fondu et en solution. Des travaux de théorie et de simulation sont également menés sur la rhéologie des polymères fondus d'architecture variée, sur la transition vitreuse des polymères fondus en volume (par élaboration d'algorithmes appropriés aux mouvements rares) et des polymères confinés (films polymères ou polymères fortement chargés). Des travaux théoriques sont également poursuivis dans le domaine des polyélectrolytes (notamment des polyélectrolytes hydrophobes), et dans celui des polysavons. Des sujets apparentés sont également étudiés en simulation : phénomènes de percolation, de croissance et d'agrégation (irréversible et, récemment, réversible).

Le domaine des polymères, quoiqu'ancien, est donc très actif sur certains sujets. Il a aussi largement irrigué d'autres domaines de la matière molle.

Cristaux liquides

Les cristaux liquides constituent l'autre domaine historique de la matière molle française. Les questions fondamentales ont été largement étudiées, et constituent aujourd'hui un cœur de compétences de notre communauté. Les recherches expérimentales et théoriques ont porté à la fois sur les thermotropes (surtout sur les aspects d'identification de phases, de description des défauts, de transitions de

phases et d'élasticité), et sur les lyotropes (avec en outre un volet plus récent et très actif sur la rhéologie de ces systèmes, voir plus bas), ainsi que sur certains systèmes mixtes (polymères cristaux liquides).

Aujourd'hui, les cristaux liquides ont beaucoup irrigué l'ensemble de la communauté. Pour l'essentiel, à part quelques rares questions fondamentales nouvelles étudiées en tant que telles (par exemple la transmission de la chiralité aux grandes échelles), les compétences cristaux liquides sont incorporées à divers domaines (mouillage, matériaux, électronique) :

- films minces, transitions d'ancrage, dépouillage (propriétés interfaciales des cristaux liquides) ;
- mise en forme de matériaux composites : interactions entre objets (isotropes ou anisotropes) méditées par l'élasticité d'un cristal liquide ;
- matériaux contenant des cristaux liquides et devant marier de nombreuses propriétés : afficheurs souples, photovoltaïque, etc.

Fluides complexes sous écoulement

Initiée dans les cristaux liquides thermotropes et plus encore dans les lyotropes, l'étude du comportement rhéologique des fluides complexes est un domaine relativement récent et actuellement particulièrement actif dans le domaine de la matière molle. Outre les lyotropes, le domaine couvre actuellement les émulsions, les micelles connectées, les mousses, les milieux granulaires. Le lien s'établit progressivement toujours davantage avec la communauté des rhéologues (plutôt ancrée sur les polymères) et avec celle des mécaniciens (matériaux granulaires).

Trois grandes questions sont étudiées sur ces systèmes :

- la localisation des écoulements dans l'espace (bandes de cisaillement, fractures) et dans le temps (fluctuations, intermittence, « rhéochaos ») ;

– la description de la transmission des efforts dans ces milieux hétérogènes et amorphes, notamment pour des milieux granulaires ;

– les transitions d'écoulement (transition vitreuse, jamming, vieillissement).

La simulation du comportement de ces systèmes est typique de l'approche théorique de la matière molle : il s'agit le plus souvent d'une méthode classique (dynamique moléculaire ou Monte Carlo) appliquée à une description mathématique simplifiée des mécanismes sous-jacents (qui, eux, relèvent spécifiquement de la matière molle : déformation des objets, interactions). Les techniques des différents groupes diffèrent souvent par le degré de précision choisi d'un côté au niveau des mécanismes microscopiques, de l'autre au niveau de la mécanique macroscopique.

Mécanique des matériaux solides hétérogènes

Il s'agit de systèmes tels que les matériaux composites à base de colloïdes, de copolymères à blocs, ou de fibres, les mousses polymères solides, les biomatériaux et les matériaux biomimétiques, les élastomères chargés aux petites et même aux grandes déformations... Du point de vue de la théorie et de la simulation, ce domaine est déjà ancien dans d'autres communautés (matériaux, mécaniciens), sans prendre en compte de manière précise le comportement à l'échelle mésoscopique. Les travaux purement théoriques sont rares aujourd'hui. Dans notre communauté, ce domaine a longtemps été restreint à la synthèse et à la caractérisation. Cependant, le lien avec les autres communautés se développe au niveau de la simulation à mesure que d'une part le comportement mécanique aux échelles mésoscopiques, accessible par les outils de la matière molle, devient pertinent, d'autre part que les techniques multi-échelles et les puissances de calcul actuelles permettent cette incorporation. On note même des travaux visant à faire le lien avec d'autres phénomènes physico-chimiques (fracture, corrosion). Il y a également dans notre communauté, et dans

des communautés très proches, des travaux numériques importants sur la transmission des efforts dans des milieux solides amorphes.

Biophysique

Le domaine de la biophysique a été fortement irrigué par la communauté de la matière molle, c'est même une tendance lourde constatée ces dernières années. Des expériences nombreuses sont accompagnées par un effort important en théorie et souvent en simulation.

Certains sujets profitent de la communauté et de l'expérience acquise dans les domaines des membranes : fluctuations et interactions entre membranes, percement membranaire, interaction entre protéines et autres objets membranaires, adhésion cellulaire (recrutement des ligands).

D'autres s'appuient davantage sur l'expérience dans les polymères : rôle des sucres dans les interactions membranaires, éjection de l'ADN ou de l'ARN viral, motilité cellulaire et dynamique du cytosquelette (polymérisation, rhéologie des polymères semi-flexibles, gels actifs, élasticité, mouillage), dynamique des mécanismes biochimiques à la fois au niveau atomistique et à de plus grandes échelles (réplication, transcription, dénaturation/renaturation des protéines, activité enzymatique, repliement de l'ARN et modulations de l'expression, reconnaissance et hybridation, diffusion des enzymes).

Citons aussi des travaux théoriques importants qui accompagnent le développement rapide d'outils pour la biochimie (plusieurs générations de méthodes d'électrophorèse) et pour la microchimie (microfluidique, électro-osmose).

D'autres sujets, menés par des personnes de la même communauté, s'appuient de manière plus globale sur les outils traditionnels de la matière molle : moteurs moléculaires, mouvement sans force.

On notera par ailleurs le domaine des biomatériaux, déjà évoqué, où les volets de

simulations numériques conjuguent celles développées dans le domaine de la biologie structurale à celles propres aux domaines des polymères. La dynamique moléculaire et les méthodes de Monte Carlo sont mises en œuvre, parallèlement à des approches mésoscopiques qui permettent d'établir des relations structures-fonctions pour des assemblages pouvant contenir plusieurs dizaines de milliers d'atomes.

8 – RELATIONS INTRA-ÉTABLISSEMENT

La section 11 est une section de taille moyenne dont le caractère interdisciplinaire se traduit par le grand nombre d'unités auxquelles sont rattachés ses chercheurs, et le nombre de départements scientifiques dont dépendent ces unités de rattachement. Les recrutements récents effectués par la section ont permis d'irriguer de manière importante des thématiques émergentes dans différentes unités de recherche, peut-être parfois au détriment des unités qui constituent le cœur historique et thématique de la section. Les interfaces avec la physique et la biologie sont évidentes ; celle avec l'ingénierie pourrait être renforcée en prenant toutefois garde aux trop grandes disparités quant aux profils et aux formations des candidats chercheurs. En tant que section du Comité National, le travail d'évaluation doit nécessairement prendre en considération ces multiples interfaces avec d'autres domaines scientifiques. La création de postes interdisciplinaires a permis de franchir certaines barrières imposées par les contours des Départements et le découpage en sections. Une réflexion doit certainement être menée pour prendre en considération la formidable montée en puissance de l'interface avec la biologie, et traduire en termes de structure d'évaluation et d'animation le dynamisme de cette communauté.

Le caractère interdisciplinaire de la section se traduit également par le nombre élevé

de Groupements de Recherches auxquels participent ses chercheurs. Sur les 20 GDR affichant la participation des personnels de la section, certains concernent de manière très forte nos thématiques, les directeurs ou directeurs-adjoints étant membres de notre communauté :

- propriétés particulières des polymères en films ultra-minces (PolyFUM) ;

- dynamique interfaciale sous contrainte mécanique (DynInter) ;

- assemblages de Molécules Végétales : croissance et organisation des plantes (GDR INRA-CNRS).

D'autres concernent des volets de biologie structurale des protéines membranaires et de l'étude des fonctions et de dynamique de macromolécules biologiques, etc. des volets d'instrumentations (cryo-électromicroscopie, spectrométrie de masse, etc.) ou de problématiques issues des nanosciences et nanotechnologies.

9 – RELATIONS AVEC L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET LES AUTRES ORGANISMES

- Le nouveau système Doctorat, Master, Licence est maintenant parfaitement intégré dans les relations qui existent entre les unités de recherche CNRS et l'enseignement supérieur. La quasi-totalité des unités interrogées fait état de relations fortes avec ces structures d'enseignement. Certaines unités se sont fortement engagées dans des actions de formations au niveau Master 2^e année, dans des volets recherche et professionnel. La désaffection des étudiants pour les études scientifiques et plus particulièrement pour certaines disciplines, telles que la chimie-physique, est inquiétante pour l'évolution future des Unités de Recherche qui relèvent de la section 11. La

participation des unités de recherche en tant qu'équipes d'accueil au sein des Écoles Doctorales est une des caractéristiques affichées, à l'exception peut être des unités en partenariat industriel. Cette situation de relations avec l'enseignement supérieur n'est cependant pas la même selon le statut de l'Unité de Recherche, i.e. Unité Propre ou Unité Mixte. Le recrutement, au travers des sections du Comité National et/ou du fléchage par la Direction du Département n'a, en aucune manière, privilégié les Unités Propres du CNRS. Cette disparité va s'accroître dans les prochaines années, au moment où les personnels recrutés dans les Unités Propres de Recherche partiront à la retraite, sans qu'une politique régulière de recrutement ait pu être mise en œuvre depuis plusieurs années. En revanche, les départs en retraite des enseignants-chercheurs se sont massivement traduits par des recrutements et affectations à des Unités Mixtes de Recherche. On constate que peu de jeunes enseignants-chercheurs ont rejoint des Unités Propres de Recherche. On a également assisté à une mobilité plus importante des chercheurs vers les métiers de l'enseignement. Les différences criantes qui existent entre l'enseignement supérieur et le CNRS au niveau des recrutements Professeurs / Directeurs de Recherche, puis au niveau des promotions 1^{re} classe et classe exceptionnelle, ne sont peut être pas étrangères à ces mouvements de personnels. Tout ceci contribue de fait à perturber de manière critique le rapport chercheurs/enseignants chercheurs dans les UMR. Les conséquences, déjà visibles, de ces politiques, ou absence de politique, ont et auront des implications majeures dans les années à venir, entre autres au niveau des recrutements de thésards. On constate déjà des UPR ayant une recherche et une organisation de la recherche fortes, qui sont confrontées à des difficultés de recrutement d'étudiants en thèse. À leur côté on trouve des UMR ayant peu de chercheurs statutaires et des enseignants-chercheurs surchargés, qui désireux de maintenir un niveau de compétitivité en recherche sont entourés d'étudiants en stage et en thèse, dans des environnements qui ne bénéficient pas toujours d'excellentes conditions d'organisation et d'in-

frastructure favorables aux meilleures conditions de recherche. Que dire des jeunes Maîtres de Conférence talentueux, qui recrutés dans des conditions de très forte compétition se voient noyés par des tâches d'organisation et d'enseignement qui ne leur permettent pas d'exprimer leur créativité et compétences en recherche !

Il est impérieux qu'une réflexion des organismes de tutelle puisse avoir lieu rapidement surtout dans un contexte où un certain nombre d'UPR vont voir leur personnel partir en retraite, euphémisme pour décrire une perte massive de savoir-faire sans que pratiquement aucune action n'ait été prise pour assurer un minimum de transfert de savoir et de connaissance. Ce constat s'applique naturellement aux personnels ITA souvent garants d'une extraordinaire richesse qui s'évaporerait, faute d'avoir été anticipée, dès qu'ils auront quitté leur Unité de Recherche. Inventer un nouveau statut d'Unité de Recherche qui saurait combiner la richesse des infrastructures et de l'organisation des UPR, à la richesse, au dynamisme et à l'attraction vis-à-vis des étudiants qu'offrent les UMR est certainement un axe majeur d'une prospective proche.

- La mixité de certaines unités de recherche avec les organismes tels que le CEA, traduit la richesse et l'ancienneté des relations et des collaborations nouées avec cet organisme de recherche. Ces liens sont souvent stratégiques pour les accès à des très grands équipements. Les chercheurs de la section ont accès à l'Institut Laue Langevin, et sont présents sur les lignes de l'European Synchrotron Radiation Facility à Grenoble. L'implication de notre communauté dans le projet Soleil est forte. Un partenariat niveau s'est mis en place récemment entre le CNRS et l'INRA, qui s'est traduit par la création d'un GDR dont la thématique porte sur les « Assemblages de Molécules Végétales ». En complément des animations classiques d'un GDR, de nouvelles actions de formation ont été expérimentées sous la forme d'un Atelier du Savoir avec la double ambition d'utiliser les outils de formation en tant qu'éléments de perspectives scientifiques.

10 – LIENS AVEC L'INDUSTRIE ET TRANSFERTS TECHNOLOGIQUES

- Le CNRS a vocation de recherche fondamentale et de faire progresser les connaissances, de les diffuser et de les valoriser.

La nature même des substrats d'étude de la section, leurs caractérisations, les voies de synthèse, de formulation et de mise en œuvre expliquent la force du partenariat qui existe avec l'industrie. Citons à titre d'exemples :

- les assemblages macromoléculaires chimiquement et thermiquement stables ; ceux qualifiés « d'intelligents » qui sont capables de changer d'état sous l'action de stimuli, etc. ;

- l'élaboration de nouveaux matériaux massiques (organiques et/ou hybrides) possédant des propriétés fonctionnelles particulières (électriques, mécaniques – adhésion, renfort, etc.) ;

- la mise en œuvre des macromolécules issues de la biomasse à des fins d'utilisations alimentaires et non-alimentaires, voire thérapeutiques, etc. ;

- les nouvelles techniques expérimentales qui dans le domaine de l'optique par exemple permettent d'aborder des problèmes industriels importants tels que l'étude des transitions hors équilibres, le vieillissement de la matière molle, etc. ;

D'autres développements, dans les domaines de la micro-fluidique, ou de la biotechnologie, etc. offrent des domaines de collaborations importants.

Ceci explique que la quasi-totalité des Unités de recherche de la section 11 est impliquée dans des actions de transferts technologiques vers l'industrie. Certaines ont bénéficié de la loi sur l'innovation et ont participé à la création d'entreprises innovantes.

- Plusieurs unités mixtes de recherches CNRS-Industrie abritent des chercheurs de

la section. Ces implications résultent de partenariats « historiques » avec des entreprises œuvrant dans le domaine des grands polymères, voire des polymères de spécialités. D'autres plus récentes concernent l'émergence de la micro-fluidique. Ces unités mixtes de recherche CNRS-industrie sont par la nature même de leur construction, des structures intrinsèquement fragiles, pour lesquelles l'appréciation de la pertinence de la thématique choisie doit correspondre aux problèmes de fonds concernant les marchés de l'entreprise concernée. Les expériences de détachement temporaire de chercheurs dans l'industrie, souvent au sein d'unités mixtes, se sont à ce jour révélées positives, la section ayant eu une attention particulière dans le suivi des personnels et des unités impliquées dans ce partenariat. On peut en effet penser que c'est au travers de ces structures que peuvent se valoriser au mieux des résultats issus d'une recherche fondamentale qui sera irriguée et valorisée par l'expérience du terrain et l'expérience industrielle.

En dehors de ce contexte de partenariat, il convient de constater que nous manquons souvent d'outils efficaces pour juger des travaux ayant une forte composante de valorisation, cette dernière pouvant prendre des aspects multiples. Il ne faut effectivement pas se voiler la face et reconnaître que dans les unités de recherche de notre communauté plus de 50% de financements des fonctionnements sont d'origine contractuelle. Force est donc de constater que des chercheurs consacrent une part non négligeable de leur temps aux actions de valorisation afin tout simplement de permettre à leur unité de fonctionner « honorablement ». Si certaines de ces actions peuvent se traduire par un dépôt de brevet, est-ce pour autant une transformation réussie du passage de la création de savoir à la création de valeur économique ? Les discours sont flous (la reconnaissance par des promotions et l'attribution de poste DR au titre de la valorisation, promulguée, puis abandonnée, etc.), le concept de valorisation mal défini et difficilement évalué, etc., le tout concourant à un malaise et à des frustrations de personnel dans les unités de recherche.

11 – ACTIONS COMMUNAUTAIRES

Certaines Unités de Recherche ont déjà intégré ou intègrent dans leurs stratégies de recrutement les nouvelles richesses et perspectives qu'offre la Communauté Européenne au travers des différents programmes visant à la construction de l'espace européen de la recherche. Les difficultés qu'affrontent des unités dans le recrutement d'étudiants en thèse au travers des programmes nationaux, sont dans certains cas compensées par les possibilités qu'offrent les programmes communautaires. Une partie importante des Unités interrogées fait état de participations dans les programmes Marie Curie ; beaucoup dans le cadre des actions individuelles, peu dans le cadre des sites de formation Marie Curie. Néanmoins, tous les acteurs impliqués dans ce programme s'accordent à reconnaître la compatibilité de sa gestion et des moyens d'organisation d'une Unité de Recherche. Décrirait-on cette action comme étant « à l'échelle du laboratoire » ! Il n'en est de même des autres programmes du 6^e PCRDT, qui nécessitent des investissements et des efforts majeurs, très souvent hors de portée des Unités de recherche, et ce malgré les aides que peuvent apporter les établissements au travers de la mise à disposition de personnel support. Les réussites de quelques laboratoires en ce domaine sont naturellement d'intérêt, mais elles semblent servir plus l'image de l'Etablissement que les intérêts d'une communauté qui œuvre pour disposer des ressources *ad hoc*

pour mener à bien les recherches en son sein et sans dispersion de ses moyens.

Il convient de mentionner qu'on assiste depuis peu à une fracture, entre les unités qui se sont impliquées dans les actions communautaires, et qui ont vu leurs efforts couronnés de succès, et celles, qui pour différentes raisons n'ont pas fait ce choix ou n'ont pas vu leurs demandes acceptées dans un contexte de très forte compétition. Cette fracture se traduit naturellement au moment de l'évaluation des unités et/ou des chercheurs, et il faut reconnaître que la participation à des actions communautaires n'est peut être pas un critère d'évaluation suffisamment apprécié. Une position clairement définie de la Direction Générale serait certainement appréciée et justifierait de prendre en compte, au même titre que les volets de transferts technologiques, les actions des chercheurs et enseignants-chercheurs en ces domaines.

Au niveau communautaire, le regroupement des moyens pour faciliter le développement et l'accès aux très grands équipements, et la mobilité accrue des personnels, sont des conséquences positives des programmes de recherche européens. Certaines réticences se manifestent quant aux objectifs prioritaires qui jugés trop ciblés, ou trop technologiques, sont perçus comme des nuisances à l'efficacité et à la flexibilité de nos actions de recherche. L'apparition de nouveaux programmes du 7^e PCRDT permettant l'expression et le soutien à des projets de recherche fondamentale est certainement un élément encourageant qui pourrait permettre de lever les réticences exprimées par une partie de notre communauté.

Notes

(1) Ce rapport est le fruit d'une écriture collective à laquelle ont contribué : Bernadette Charleux, Jean François Gérard, Serge Pérez, Patrick Davidson, Christian Ligoure, Martin In, Philippe Richetti, Cyprien Gay, Patricia Bassereau et Sylvianne Lesieur.

La coordination finale a été réalisée par le secrétaire scientifique de la section, Emanuel Bertrand et par le président Serge Pérez.