

15

SYSTÈMES MOLÉCULAIRES COMPLEXES

Didier CHATENAY

Président

Philippe Barois

Jean-Paul Chapel

Thierry Charitat

Bernadette Charleux

Christophe Chassenieux

Édith Dellacherie

Lydie Dorthe

Jean-Christophe Gimel

Jean-François Joanny

Maryse Joly

Françoise Laupretre

Jacques Malthete

Christophe Mingotaud

Mikel Morvan

Serge Perez

Grégoire Porte

Jean-François Sadoc

Jean-Claude Soutif

Roger Spitz

Paul Tordo

La section 15 « Systèmes moléculaires complexes » du Comité National de la Recherche Scientifique a une histoire relativement récente. Créée au début des années 1990, cette Section a eu pour objectif de rassembler une communauté de chimistes, physico-chimistes et physiciens dont les préoccupations scientifiques justifiaient le rassemblement au sein d'une seule et même Section du Comité National. Très succinctement, on peut dire que les scientifiques engagés dans le type de recherches couvertes par la section 15 partagent une culture commune qui leur permet d'avoir comme un des objectifs essentiels de leurs recherches l'élucidation des mécanismes d'organisation et l'étude des propriétés (qu'elles soient mécaniques, rhéologiques ou de réactivité pour n'en citer que quelques-unes) de divers matériaux moléculaires ou macromoléculaires, en utilisant des moyens de synthèse chimique, de mise en forme et de mesures physiques. À partir de ce constat on peut identifier les activités fondatrices de la communauté concernée par la section 15 ; il s'agit essentiellement de la chimie des molécules de bas poids moléculaire (amphiphiles, cristaux liquides), de la chimie macromoléculaire et de la physique et la physicochimie des systèmes dérivés de ces chimies. On voit donc qu'il existe (ou qu'il devrait exister) un continuum allant de la synthèse de molécules nouvelles (mais aussi de la mise au point de nouveaux procédés de

synthèse) jusqu'aux études physiques et physico-chimiques. Le présent rapport débutera donc par une analyse de l'état de l'art et des perspectives de ces diverses activités constituant le socle de notre Section :

- physique et physico-chimie de la matière molle ;
- physique/Biologie ;
- chimie des molécules de bas poids moléculaire ;
- chimie macromoléculaire ;
- biopolymères et matériaux macromoléculaires naturels.

L'une des évolutions globales les plus remarquables de notre communauté est l'apparition dans chacun des domaines cités ci-dessus de préoccupations liées aux domaines des Sciences du Vivant, du Diagnostic et de la Thérapeutique. Actuellement notre Section regroupe une communauté possédant des éléments de culture communs et un bagage à la fois conceptuel et expérimental qui devraient permettre un développement spectaculaire de ces activités. Si ces préoccupations sont présentes depuis un certain temps maintenant chez les chimistes et les physico-chimistes de notre section (surtout à travers des problématiques liées à la vectorisation, à l'environnement, etc.) elles sont relativement nouvelles chez les physiciens et c'est la raison pour laquelle nous leur accorderons un chapitre particulier.

Mais ce rapport est aussi l'occasion d'identifier, outre les évolutions propres à chaque discipline concernée, les évolutions plus globales de notre communauté, ainsi que les points qui devraient faire l'objet d'une attention et d'une action volontariste, à la fois de la part des scientifiques engagés dans les recherches couvertes par notre Section, mais aussi de la part de nos organismes de tutelle.

Parmi les points qui devraient faire l'objet d'une attention particulière, nous n'avons pas cherché à être exhaustifs et nous avons limité notre réflexion aux problèmes que posent :

- l'innovation et la valorisation ;

- les contacts entre physique et chimie au sein de notre section ;

- les contacts entre la Chimie de notre section et la Chimie des autres sections du Comité National.

1 - PHYSIQUE ET PHYSICOCHIMIE DE LA MATIÈRE MOLLE

La physique de la matière molle étudie les fluides complexes qui sont en général des liquides pour lesquels les échelles de taille pertinentes se situent dans le domaine mésoscopique ou colloïdal (entre 1 nm et 1 micron). Ces fluides sont souvent structurés par auto-assemblage et les fluctuations thermiques y jouent un rôle essentiel ; ils sont largement impliqués dans de nombreux problèmes industriels et la plupart des domaines que nous citerons ci-après sont directement concernés par les applications pratiques.

L'étude des fluides complexes a longtemps été propre aux chimistes avant que les physiciens ne s'y intéressent depuis une trentaine d'années. La France a joué un rôle pionnier dans ce renouveau d'intérêt pour la « *matière molle* », dont les physiciens considèrent souvent qu'elle est une spécialité française. Cela est dû aux travaux des théoriciens qui se sont lancés dans ce domaine à la suite de de Gennes, mais aussi à la qualité des expériences, notamment de diffusion des rayonnements (lumière, rayons X et neutrons), qui ont permis des progrès considérables dans l'étude de la structure des fluides complexes. Il y a eu aussi des techniques optiques (texture), dynamiques locales type RMN, RPE. Ceci a été vrai pour les polymères en solution et en phase fondue, puis pour les systèmes amphiphiles (microémulsions, membranes fluides). L'apport des travaux de l'école française des cristaux liquides est également largement reconnu.

Depuis le dernier rapport de conjoncture, la physique des fluides complexes, s'appuyant sur les études structurales antérieures, a évolué dans deux directions : d'une part vers l'étude de systèmes plus complexes, d'autre part vers la compréhension des comportements dynamiques, éventuellement loin de l'équilibre thermodynamique ou soumis à des contraintes extérieures fortes. Parmi les domaines qui ont émergé, et vers lesquels la communauté des physiciens de la matière molle nous semble devoir concentrer ses efforts, nous citerons :

- **Les systèmes mixtes :** Certains systèmes obtenus par mélange de fluides complexes présentent des propriétés nouvelles, comme les mélanges polymères-colloïdes qui jouent un rôle important dans de nombreux processus de formulation, ou les mélanges polymères-cristaux liquides dont les propriétés de diffusion de la lumière sous champ électrique sont utilisées pour l'affichage. Les mélanges entre polymères chargés et tensioactifs ont été étudiés en introduisant des polyélectrolytes dans des films de savon (on peut ainsi montrer que la force d'interaction entre les deux surfaces du film est oscillante). De manière générale, les systèmes en solution aqueuse, auxquels on s'intéresse de plus en plus, posent des problèmes intéressants notamment au niveau des effets électrostatiques. Les systèmes mixtes organiques-inorganiques semblent être également l'objet d'une grande attention. Certains systèmes intègrent dans une même molécule deux fonctionnalités différentes qui confèrent à l'ensemble des propriétés nouvelles : c'est le cas par exemple des « muscles artificiels » constitués de molécules mésogènes greffées sur un réseau polymère.

- **Les films minces :** Les propriétés des films complexes sont modifiées dans des films minces dont l'épaisseur est de l'ordre de grandeur de l'échelle de taille caractéristique. L'étude des films minces permet de s'attaquer, à l'échelle colloïdale, à des problèmes aussi fondamentaux que l'adhésion, la friction, la lubrification. Il y a aussi un renouveau d'intérêt récent pour la transition vitreuse et la cristallisation de polymères dans les

films minces. On accède maintenant à la structure de couches monomoléculaires de cristaux liquides auto-supportées ou de films de Langmuir de phospholipides et on peut espérer faire de même pour les membranes biologiques. L'étude des films minces de savon a connu un regain d'intérêt à travers le développement des techniques telles que les mesures de pression de disjonction et la panoplie des situations étudiées (incorporation de polyélectrolytes, de protéines) s'est élargie. Il en est de même de l'étude des mousses où de nombreux travaux concernent maintenant les propriétés dynamiques (drainage, comportement sous cisaillement). Au sein de cette thématique « Films minces », il faut noter que les phénomènes de mouillage/démouillage ont gardé une actualité certaine, tant dans le domaine des polymères que dans celui des liquides simples ou des systèmes auto-assemblés tels que les vésicules lipidiques.

- **La rhéologie :** Les fluides complexes ont une susceptibilité très grande vis-à-vis de contraintes extérieures et leurs propriétés sous écoulement fort sont souvent spectaculaires et peu prévisibles. La recherche dans ce domaine ne doit pas se contenter de mesures rhéologiques macroscopiques, mais doit coupler ces mesures à une description plus moléculaire des phénomènes observés ; on parle parfois de rhéophysique. Des résultats importants ont été obtenus, par exemple sur la texture de polymères cristaux liquides sous écoulement, sur les instabilités d'écoulement des systèmes rhéoépaississants et rhéofluidifiants, sur la rhéologie de polymères associatifs, sur la formation de structures en oignons à partir de phases lamellaires, sur la production d'émulsions monodisperses par cisaillement. La description théorique et la compréhension à l'échelle mésoscopique de tous ces effets sont difficiles et méritent d'être développées.

- **Les matériaux granulaires :** Les matériaux granulaires ne font pas partie de la matière molle *stricto sensu*, mais de nombreuses situations rencontrées dans les fluides complexes hors équilibre (émulsions concentrées, mousses, pâtes colloïdales) posent des problèmes très similaires à ceux

rencontrés dans les systèmes granulaires secs. Ce sont des systèmes très hors d'équilibre dans lesquels les fluctuations ne sont pas thermodynamiques : les réorganisations spontanées sont très lentes ; on parle de vieillissement. De nombreux résultats expérimentaux ont été obtenus, mais la description théorique reste très phénoménologique. Citons un thème tel que le *jamming*, qui concerne des matériaux aussi différents que les polymères vitreux, les colloïdes ou les granulaires secs.

- Outre ces thématiques, le domaine a également été marqué par quelques avancées **spectaculaires dans le domaine des techniques expérimentales**. En diffusion dynamique de la lumière, les développements des caméras CCD permettent d'effectuer la détection résolue en temps à très petits angles simultanément sur de nombreux canaux : on peut ainsi caractériser des dynamiques extrêmement lentes (réorganisation lente et vieillissement) de systèmes éventuellement opaques (diffusion multiple). Le développement récent de techniques de spectroscopie sur molécule unique permet d'apporter un nouvel éclairage sur la dynamique moléculaire au voisinage de la transition vitreuse. L'utilisation de techniques telles que la microscopie à effet tunnel, la réflectivité des rayons X, la spectroscopie infrarouge à modulation de polarisation a conduit à une avancée importante dans la compréhension de l'organisation aux interfaces d'un cristal liquide confiné et de la structure de la surface de liquides simples tel que l'eau. Le rayonnement X des synchrotrons a permis de déterminer la structure des phases à joints de grains et la diffusion résonante la structure complexe des phases mésomorphes ferriélectriques.

- À côté des études décrites ci-dessus, au caractère physique très affirmé, un certain nombre d'équipes relevant de la section 15, mais aussi d'autres sections (en particulier des sections 16 et 17) développent des recherches *à la frontière de la physique et de la chimie* (parfois aussi de la biologie) sur les systèmes moléculaires organisés et leurs applications potentielles dans divers domaines. Ces recherches reposent pour une large part sur l'obtention de nouvelles molécules à caractère amphiphile ou sur les

propriétés particulières de systèmes mixtes associant, par exemple, deux types de tensioactifs ou un tensioactif et une molécule autre (systèmes « catanioniques », systèmes hydrogénés/fluorés, systèmes lipides/molécule biologique exogène, etc.)

- **Dans le domaine de la synthèse**, des efforts sont faits dans la préparation de tensioactifs non conventionnels apportant des propriétés non seulement de dispersants ou d'agents de surface, mais aussi des propriétés complexantes, bactéricides, antivirales, compatibilisantes, etc. Même si la détermination des diagrammes de phases de systèmes multicomposants incluant ces nouvelles molécules ne constitue plus une fin en soi, elle n'en reste pas moins nécessaire pour pouvoir envisager les aspects appliqués (formulation, vectorisation, nouveaux matériaux, etc.)

- **Parmi l'extrême diversité des systèmes étudiés**, on voit se développer un intérêt particulier pour les émulsions concentrées, les systèmes mixtes lipides/tensioactifs susceptibles de présenter une transition micelles/vésicules, les mésoporeux associant les procédés sol-gel pour confiner des structures micellaires de morphologies variables (pores calibrés, matériaux pour chromatographies, etc.), les colloïdes magnétiques (agents de diagnostic, tri de cellules, etc.), les phases cubiques (délivrance contrôlée de principes actifs, confinement d'enzymes, capteurs biologiques, etc.), les films de Langmuir en association avec des molécules biologiques ou des modèles polymères (modèles de membrane). Certains de ces domaines sont bien développés en France à l'heure actuelle mais quelques uns (comme les mésoporeux par exemple, et ce malgré les activités remarquables de quelques groupes) mériteraient une attention plus soutenue.

- L'utilisation de certains systèmes complexes (systèmes micellaires, microémulsions, phases cubiques, etc.) comme **milieux réactionnels**, si elle n'a pas totalement répondu aux attentes multiples et peut-être trop optimistes, a néanmoins connu un certain nombre de succès : synthèse de colloïdes métal-

liques (semi-conducteurs, plutôt développés en section 17), synthèse de latex polymère, gain de sélectivité dans certaines réactions, utilisation de milieux microhétérogènes, mais macroscopiquement isotropes, pour modéliser les systèmes biphasiques aqueux/organiques classiques (mécanismes aux interfaces) ou encore pour étudier les cinétiques de réactions rapides impliquant un réactif hydrophile et un réactif hydrophobe.

- Les **applications des systèmes moléculaires organisés dans le secteur de l'analytique**, et en particulier de la séparation, constituent un domaine peu exploré en France, qui néanmoins pourrait être porteur (ce domaine concerne un très faible nombre de chercheurs en section 15). Si la chromatographie micellaire n'est pas une technique nouvelle, le développement de procédés sans solvants remplaçant une phase organique pure par des particules colloïdales pourrait représenter, dans certains cas, une alternative à l'extraction par solvant (extraction micellaire couplée à l'ultrafiltration pour la décontamination d'effluents chargés en métaux lourds, par exemple). Les séparations énantiomériques par reconnaissance sélective à la surface de particules colloïdales portant des sélecteurs chiraux sont un autre aspect qui commence à susciter de l'intérêt.

- Il est également important de mentionner que les concepts associés au domaine des colloïdes ont montré qu'ils peuvent apporter beaucoup pour mieux comprendre certains problèmes relevant de l'extraction liquide-liquide, en particulier dans le domaine du nucléaire (travaux du groupement de recherches associant le CNRS à des organismes tels que le CEA, l'ANDRA, EDF). Ainsi, les problèmes liés à l'apparition de troisième phase peuvent s'expliquer non seulement par l'existence de micelles inverses formées par association des molécules d'extractant, mais la prédiction des courbes de démixtion est possible par une approche de même type que l'approche de Flory-Huggins dans le cas des solutions de polymères ou encore par une approche prenant en compte les potentiels attractifs entre les sphères collantes que constituent ces micelles.

2 – PHYSIQUE/BIOLOGIE

Nous redécouvrons périodiquement les richesses de la pluridisciplinarité et, de ce point de vue, le « point triple biologie-chimie-physique » est particulièrement à l'honneur à l'heure actuelle. Ces périodes de convergence ont eu tantôt pour origine des avancées technologiques (microscopie optique il y a bien longtemps, cristallographie X, microscopie électronique, RMN, etc.) tantôt des avancées conceptuelles (réflexion de Schrödinger, théorie de l'influx nerveux, premières théories des muscles, etc.). Même si la période que nous vivons aujourd'hui n'est pas nouvelle en ce sens, elle fait néanmoins preuve d'une grande vitalité comme en témoigne déjà le nombre impressionnant de résultats originaux. Parmi les domaines qui ont récemment émergé ou qui ont connu un regain d'intérêt, nous retiendrons :

- **La manipulation de molécules uniques** : On dispose à l'heure actuelle d'un certain nombre de techniques de manipulations tout à fait originales qui permettent d'étudier le comportement de certaines molécules biologiques au niveau de la molécule unique ; parmi les molécules étudiées, on peut citer l'ADN et diverses enzymes qui y sont associées (ARN polymérase, topo-isomérase, etc.), divers moteurs moléculaires linéaires et rotatifs, les protéines de condensation agissant sur l'ADN, les protéines impliquées dans les mécanismes d'adhésion cellulaire, etc. Ces expériences, d'une grande beauté et techniquement très élaborées, permettent d'atteindre les mécanismes moléculaires. Par exemple, on accède aux rôles joués par les forces et les couples non seulement dans la détermination des structures adoptées par l'ADN, mais aussi dans les mécanismes d'action des enzymes, ainsi qu'au caractère stochastique des phénomènes. Ces expériences ont déjà apporté de nombreux enseignements, mais il y a encore beaucoup à apprendre et ce domaine est appelé à se développer largement. Cette activité expérimentale est utilement complétée par des analyses théoriques fondées sur l'utilisation de la mécanique statistique. Un des développements naturels de

cette activité devrait concerner des systèmes mettant en jeu un nombre de molécules comparable à celui trouvé dans le vivant.

• **La physique à l'échelle cellulaire :**

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 et de la nanophysique. En conséquence, les concepts d'auto-organisation, de transition thermodynamique, et plus encore dynamique, s'avèrent être des outils conceptuels importants. Au plan expérimental, l'introduction des protéines chimères « GFP » (et leurs semblables), d'alternatives comme les nanocristaux, l'introduction de nouvelles microscopies (comme la microscopie multiphotonique, la microscopie fondée sur le transfert résonant de fluorescence, sur la corrélation de fluorescence) ouvrent la voie aux études quantitatives de la dynamique cellulaire. 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. L'adhésion, la signalisation, le transport, la mitose, la motilité cellulaire, la transduction des signaux sont des exemples de domaines où les interactions entre physicochimie et biologie apporteront beaucoup et commencent déjà à produire des résultats nouveaux.

• **Les systèmes modèles :** Un corollaire très utile aux études sur les systèmes biologiques est fourni par la conception et la réalisation de systèmes simplifiés isolant une ou plusieurs caractéristiques dont on veut atteindre une compréhension quantitative comparable à celle que l'on peut acquérir en physique de la matière molle. Depuis longtemps par exemple, la communauté a travaillé sur la physique et la physicochimie des vésicules phospholipidiques. Ces études se poursuivent par l'introduction de diverses extensions hors d'équilibre, l'étude des propriétés d'adhésion dans des situations se rapprochant de celles du vivant, l'étude des interactions cytosquelette/membrane, cytosquelette/membrane/moteurs. Les mécanismes de la motilité peuvent aussi s'aborder de manière biomimétique. Cette

approche permet une compréhension plus détaillée que par l'étude directe du vivant, car elle permet de faire varier les paramètres dans des gammes plus étendues qu'*in vivo*, tout en permettant une analyse quantitative.

• **Échelle multicellulaire :** Ce domaine est appelé aussi à se développer considérablement. Parmi les problèmes importants qui semblent mûrs pour une approche physique ou physicochimique, citons l'organisation et le fonctionnement de populations neuronales, le développement embryonnaire (avec en particulier le rôle des contraintes mécaniques sur le développement), la morphogenèse de systèmes simples comme l'hydre. L'étude des tissus est pour l'instant moins avancée. Les approches physique et physicochimique apporteront une nouvelle manière d'aborder les problèmes.

• **Biotechnologie, génomique et protéomique :** Notre communauté peut intervenir à plusieurs niveaux dans la biotechnologie. Le succès de l'utilisation des « biochips » dépend fortement de la maîtrise de la physicochimie du greffage des brins d'ADN ou des protéines aux interfaces. Il semble que celui-ci soit mal maîtrisé à l'heure actuelle et notre communauté est très bien armée pour apporter des contributions très utiles. 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. 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. 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.

• **Les biomatériaux :** L'évolution a sélectionné des matériaux qui souvent ont des propriétés spectaculaires. La compréhension fondamentale du déterminisme de

ces dernières et la synthèse de succédanés « intelligents » sont susceptibles d'apporter des améliorations considérables dans la science et la technologie des matériaux. Cette approche est évidemment importante pour la réalisation de prothèses, mais pas uniquement ; la compréhension des nacres ou des fils d'araignée, par exemple, doit permettre de créer des matériaux d'une résistance exceptionnelle. La synthèse de nouveaux matériaux actifs (c'est-à-dire capables de remplir une fonction comme le font les protéines) paraît aussi promise à un bel avenir.

3 – LA CHIMIE DES MOLÉCULES DE BAS POIDS MOLÉCULAIRE

Cette chimie s'est brillamment illustrée ces dernières années dans différents domaines touchant aux matériaux à propriétés spécifiques, optiques, électriques et magnétiques, grâce à une approche qui, en alliant conception, synthèse moléculaire et mesures physiques, permet de cerner méthodiquement, puis d'ajuster les paramètres structuraux qui conditionnent les propriétés que l'on désire améliorer. On peut citer la réalisation (depuis la synthèse jusqu'à la mise en forme) de matériaux pour l'optique non linéaire, de matériaux électroluminescents, photoréfractifs, de matériaux pour la conversion photovoltaïque, l'élaboration desdits matériaux reposant à la fois sur une large variété de techniques (spin-coating, films de Langmuir-Blodgett) et sur une grande diversité de composés nouveaux (dérivés du fullerène, de sucres, etc.).

Dans le domaine des cristaux liquides thermotropes, l'accent a été mis sur la chiralité moléculaire et ses conséquences structurales (mésophases lamellaires chirales frustrées, mésophases ferro-, ferri- ou antiferroélectriques, phases bleues smectiques). Les effets liés à l'introduction d'une chiralité moléculaire

dans des systèmes thermotropes ioniques et des mésophases lyotropes sont de la même façon analysés, en particulier dans les phases cubiques bicontinues fort peu étudiées jusqu'à présent sous cet aspect. Dans le domaine des phases lyotropes également, de récents travaux résultent de la synthèse de nouveaux tensioactifs tels que les géminis ou certains composés fluorés. La reconnaissance moléculaire est utilisée avec profit pour moduler l'architecture d'édifices supramoléculaires dont les éléments sont associés par liaisons hydrogène ou par liaisons de coordination. Cette dernière thématique, où la chiralité intervient également, est aussi présente dans les sections 16 et 18. L'étude de matériaux ferroélectriques formés de composés mésogènes coudés non chiraux a suscité un grand engouement et demeure très active. Citons, enfin, l'élaboration de nouveaux mésogènes à propriétés mésomorphes colonnaires, utilisés comme transporteurs de charges dans des films orientés.

Il faut ici souligner que, contrairement à la situation japonaise, le relais industriel français dans le domaine de l'affichage reste déficient (même s'il y a un exemple de société récemment créée directement à partir des activités de recherches menées dans un Laboratoire relevant de la Section 15), alors que la recherche qui, dans nos laboratoires, s'intéresse aux phénomènes d'orientation à l'interface solide/cristal liquide, est l'une des plus avancées. Par ailleurs, les spécialistes français des mésogènes polymères ou de bas poids moléculaire, ont montré qu'ils savaient imaginer puis préparer la molécule qui conduit à des assemblages mésomorphes possédant la symétrie et les propriétés souhaitées. On peut mentionner à cet égard des travaux prometteurs dans l'élaboration de muscles artificiels (à partir de polymères décorés de motifs mésogènes dont la chimie est celle des petites molécules organiques) et la mise en œuvre de la technique de l'empreinte moléculaire. De plus, la démarche des chimistes mésomorphistes permet d'accéder à des mésophases exotiques dont l'existence n'a pas été obligatoirement prévue par les théoriciens, mais qui ont néanmoins donné une forte impulsion à un grand nombre d'études

physicochimiques. Il conviendra donc de se soucier de la relève, pour ne pas perdre ces précieuses compétences.

Parallèlement aux travaux susmentionnés, qui reposent sur la synthèse organique de molécules de bas poids moléculaire, on assiste, en particulier en section 15, à une utilisation de plus en plus importante de systèmes recourant à la chimie inorganique et à la chimie des surfaces. Cette ouverture vers d'autres « chimies » est ainsi clairement marquée dans l'analyse des propriétés d'organisation de particules minérales ainsi que dans l'élaboration de substrats rendus chimiquement ou physiquement anisotropes pour l'étude de divers problèmes physiques.

4 – CHIMIE MACROMOLÉCULAIRE

4.1 SITUATION ET DYNAMIQUE DE LA POLYMERISATION

La chimie macromoléculaire a marqué tout le vingtième siècle en faisant émerger un grand nombre de matériaux synthétiques de la vie quotidienne ou professionnelle dont certains, les polymères de grande diffusion, constituent les plus gros tonnages de produits finis de la chimie organique. Alors que la plupart des problèmes de synthèse semblaient résolus et que les études auraient pu se limiter à des détails de mécanismes, la dernière décennie a vu se réaliser de substantiels progrès dans le domaine de la polymérisation. Il s'agissait de faire face à une demande de performance dans les propriétés d'usage du matériau polymère qui ne pouvait plus être satisfaite avec des outils trop simples. Le contrôle fin de la polymérisation, et plus précisément la suppression des réactions arrêtant la croissance des chaînes, donne accès à des polymères plus performants

mais aussi à des architectures macromoléculaires de plus en plus sophistiquées dans la précision des enchaînements ou le contrôle des branchements par exemple. La démonstration du principe de contrôle des réactions a été faite en polymérisation anionique dans des conditions d'abord peu réalistes, récemment plus proches des exigences industrielles, mais elle ne s'applique qu'à un nombre limité de monomères. Les enjeux sont ensuite passés à la polymérisation cationique et surtout radicalaire, laquelle concerne non seulement beaucoup de grands polymères, mais ouvre la porte à des procédés de « chimie douce », comme les réactions en milieu dispersé, en particulier dans l'eau. Ceux-ci, tout en s'affranchissant des problèmes de viscosité inhérents aux polymérisations en solution ou en masse, présentent les avantages – en particulier écologiques – de l'absence de solvant. Un arsenal souvent sophistiqué de moyens issus de la synthèse organique et organométallique est à la base des nouveaux moyens de contrôle des réactions et l'on voit poindre les premières applications, l'industrie française étant assez bien placée. C'est avec des outils semblables et des objectifs voisins que s'est développée la catalyse de polymérisation. Elle se limitait à une classe particulière de polymères, essentiellement les polyoléfines, qui représentent à elles seules plus de la moitié du tonnage total de ces matériaux. L'utilisation de catalyseurs de coordination comme les métallocènes, ou d'apparition plus récente à base des métaux de transition de la partie droite du tableau de Mendeleïev, permettent d'approcher les limites théoriques des propriétés – par exemple mécaniques ou optiques – des polymères, essentiellement par un contrôle fin de leur structure moléculaire, tout en permettant de polymériser catalytiquement un nombre croissant de monomères et d'aborder les réactions en milieux polaires ou même dans l'eau.

À côté des procédés en milieu dispersé et sans viscosité, qui incluent maintenant la polymérisation en milieu supercritique, les activités qui assument le milieu visqueux continuent de se développer. Il s'agit de la chimie de polycondensation, assez largement développée par

l'industrie, mais aussi de la chimie en machine de transformation avec des problématiques proches de la chimie organique, souvent loin de ses conditions habituelles.

Le nombre de chercheurs CNRS impliqués dans les recherches en chimie et procédés de synthèse est minime, moins de 25 permanents pour toutes les disciplines représentées dans la section 15 et le nombre de laboratoires est petit, ce qui évite la dispersion. La position internationale est bien meilleure que cet engagement quantitatif ne pourrait le laisser supposer avec une reconnaissance forte dans les domaines actuellement les plus « chauds ». Cette situation a bénéficié parfois de la collaboration de domaines connexes représentés dans les sections 16 et 18 en particulier, mais une amélioration de l'interdisciplinarité entre chimistes reste encore possible. La frontière avec le génie chimique est souvent ténue en polymérisation, où il faut tenir compte de contraintes spécifiques comme la viscosité ou l'hétérogénéité des milieux réactionnels. Une partie très minoritaire des recherches se fait dans le cadre SPI. Les relations existent mais pourraient être consolidées, la bonne chimie ne se valorisant que dans des procédés performants.

4.2 UN OUTIL DE BASE POUR LES MATÉRIAUX : LA PLURIDISCIPLINARITÉ

Des enjeux apparemment triviaux mais d'une grande importance économique, comme la réalisation de pare-chocs d'automobiles ou de peintures compétitifs, tout en obéissant à l'évolution des normes et des règlements qui associent performance, innocuité, écologie et contraintes économiques, obligent à mettre en œuvre des moyens extraordinairement précis de synthèse incluant un grand nombre de spécialités dans leurs progrès récents, y compris la chimie théorique ; de tels enjeux reposent également sur une meilleure compréhension de la relation entre la structure moléculaire et l'organisation aux échelles nanoscopiques ou microniques, comme sur la prise en compte

de l'existence d'interfaces complexes dans des matériaux hybrides, par exemple. Outre la chimie, cela oblige à faire appel tout aussi bien à des concepts issus de la physique et aux moyens de caractérisation des physicochimistes qu'aux différentes techniques de modélisation et de simulation. Les propriétés mécaniques font ainsi l'objet d'études compétitives diversifiées où l'on peut distinguer l'approche plus phénoménologique des mécaniciens et une approche qui utilise l'expérience de la métallurgie physique, avec des activités dispersées pour l'essentiel entre le département SPI et la section 15. Les enjeux essentiels sont dans la compréhension de la phase amorphe (et donc de la transition vitreuse), dans la création et la caractérisation d'assemblages composites comportant des nanostructures, dans la prévision de la durabilité du matériau avec des modélisations et des capteurs adaptés à ces objectifs. Les propriétés des polymères ne peuvent s'exprimer que par l'intermédiaire des techniques de mise en œuvre qui bénéficient des progrès de disciplines de base qui, comme la rhéologie, sont largement sorties de l'empirisme. En dehors des grands polymères, on verra ci-dessous que des recherches très diverses impliquent la majorité des effectifs travaillant dans la discipline. Il faut là encore s'efforcer de mettre en contact les communautés qui s'intéressent à ces problèmes et qui appartiennent souvent à des sections différentes du Comité National.

4.3 LES MOTEURS DE LA DIVERSIFICATION DES MATÉRIAUX À BASE DE POLYMÈRES

La mise en œuvre des moyens de synthèse destinés à réaliser des objets complexes à base de polymères met l'accent sur les moyens de développer ces objets plutôt que sur la recherche des mécanismes chimiques. L'association de propriétés moléculaires ou supramoléculaires et d'architectures conduit à une grande diversité de propriétés pas toujours prévisibles. De nombreux labo-

ratoires sont impliqués dans cette démarche à des titres et avec des objectifs très divers. Les structures envisageables sont innombrables. Certains domaines font l'objet d'une compétition internationale sévère, comme les polymères hyperbranchés et les dendrimères, qui font souvent appel à des chimies très sophistiquées ; les objets extraordinairement divers issus de la polymérisation en émulsion conduisent constamment à des applications nouvelles, en particulier en biologie ; des objets hybrides associant polymères et minéraux, que l'on rencontrait déjà dans les composites à matrice de grands polymères, peuvent se retrouver ici avec une plus grande diversité de partenaires associés. Ce domaine concerne plus de laboratoires et des effectifs plus importants que la recherche en chimie macromoléculaire, avec une interdisciplinarité très affirmée, des aspects plus ou moins bien valorisés.

À côté de l'élaboration chimique des polymères, il existe un vaste domaine de création de propriétés où c'est l'assemblage des chaînes polymères qui fait apparaître des fonctions. La physicochimie des assemblages de polymères est un domaine d'une grande diversité qui joue d'états physiques variés entre solide et liquide, avec des problématiques très complexes et de nombreuses possibilités d'applications. L'objectif final est de contrôler des propriétés macroscopiques. Ce domaine est par excellence celui de l'interdisciplinarité entre la chimie et la physique, et présente des problématiques et des outils communs avec d'autres domaines de la matière molle, comme c'est le cas, par exemple, pour les polymères cristaux liquides. Le vrai point commun de tous ces matériaux est que de la complexité des structures peuvent naître des fonctions simples. Par exemple, des propriétés en volume interviennent dans le transport sélectif, le stockage et le relargage contrôlé. Dans la matière molle, les gels et les systèmes polymères auto-assemblés dans l'eau et souvent stimulables ont inspiré une grande diversité d'approches où une empreinte nationale est parfaitement identifiable. Les propriétés en surface sont un autre domaine abordé dans des thèmes aussi différents que l'adhésion, la tribologie et, plus générale-

ment, toutes les combinaisons mettant en œuvre les polymères aux interfaces. Même si certains aspects cités, et plus généralement les propriétés mécaniques, renvoient à des applications industrielles, ce domaine n'est pas encore exploité à la mesure de la valeur des recherches, qui elles-mêmes pourraient bénéficier d'une meilleure structuration d'activités très diverses mais souvent complémentaires.

Un autre regard sur les polymères peut être porté à partir des fonctions non spécifiques à ces matériaux, qui peuvent être présentes dans la structure moléculaire ou apportées par l'organisation du matériau comme on vient de l'évoquer. Les applications biologiques utilisent d'une part la biocompatibilité ou la tolérance de certaines structures pour élaborer des produits à usage permanent (implants, prothèse) ou temporaire (vectorisation de médicaments), d'autre part des systèmes de reconnaissance implantés sur des particules nanométriques à la base des outils de diagnostic rapide. Les méthodes de séparation qui connaissent un développement très important, avec encore plus de potentialités, utilisent des matériaux poreux ou non. Parmi les applications dites de haute technologie, les polymères optiquement, électroniquement ou électriquement actifs ont attiré quelques équipes. Dans l'ensemble, les effectifs impliqués sont modestes et les matériaux produits ne sont pas toujours évalués ; certains domaines sont même abandonnés, là encore sans prendre la mesure des enjeux scientifiques et économiques. La difficulté dans tous ces domaines vient du morcellement des recherches fondamentales et parfois de l'absence d'une industrie nationale ayant une volonté fédératrice.

La science des polymères s'est toujours développée dans la pluridisciplinarité. Elle bénéficie dans la section 15 de rapprochements interdisciplinaires utiles, mais qui ne couvrent pas toujours l'ensemble des besoins d'autres domaines de la chimie, des sciences pour l'ingénieur et de la physique. Avec les polymères naturels, on touche au monde du vivant, mais les possibilités de connexion avec la biologie sont bien plus nombreuses. Une

bonne partie des activités se trouve dans une interface avec la matière molle moléculaire, avec des concepts et des intérêts communs dans le domaine de l'utilisation des grands instruments par exemple.

4.4 BIOPOLYMÈRES ET MATÉRIAUX MACROMOLÉCULAIRES NATURELS

Les réactions photosynthétiques, suivies de transformations biosynthétiques de grande complexité génèrent chaque année plus de 10^{12} tonnes de molécules et macromolécules naturelles. Les molécules et biopolymères glucidiques représentent la majeure partie de cette production, dont à peine 3 % est mis à profit par l'Homme.

Les macromolécules glucidiques sont aussi 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 étroitement 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. En étroite relation avec la composition et certains détails structuraux, ces macromolécules seront douées de propriétés anticoagulantes, anti-thrombotiques, anti-tumorales, immunostimulantes, anti-inflammatoires. Les biopolymères possèdent un ensemble de propriétés (biocompatibles, biodégradables et biorésorbables) 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 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 synthèse macromoléculaire ne concernent pas cette famille de biopolymères. Celles qui relèvent de la modification chimique (et enzymatique) sont appliquées avec succès, même si elles se heurtent au caractère polyfonctionnel 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, non-centrosymétriques, 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 chimiques en phase hétérogène, qui permettent une meilleure compatibilisation avec des solvants ou matrices environnantes.

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 sont les résultantes 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 conduit à la caractérisation précise de la composition chimique fine de ces systèmes macromoléculaires ; ceci ne permet toutefois pas d'appréhender une fonction biologique, propriété fonctionnelle ou une opération technologique. Les caractérisations des interactions à caractère fonctionnel doivent être développées, tout en insistant sur l'impérieuse nécessité de comprendre et de modéliser ces structures et/ou mécanismes de l'échelle moléculaire à l'échelle supramoléculaire. Il convient de ne pas restreindre un cadre de travail qui doit permettre de comprendre et de modéliser les structures, les interactions des molécules et macromolécules biologiques, 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 convient d'intégrer la richesse des outils qu'offrent les avancées biologiques, tant au niveau de la perturbation des fonctions biologiques au travers de 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.

5 – INNOVATION/ VALORISATION

De nombreuses thématiques de la section 15 sont susceptibles d'intéresser l'industrie. À titre d'exemple, on peut citer dans le domaine de la chimie de spécialité :

- les assemblages supramoléculaires, très stables chimiquement et thermiquement ou capables d'un changement d'état sous l'action d'un stimulus (gradient de cisaillement, température, rayonnement, environnement chimique) ;

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

- les nouvelles techniques expérimentales. Des avancées remarquables en optique avec le développement de la DWS (« Diffusive Wave Spectroscopy ») et des caméras CDD, ont permis d'étendre la diffusion de lumière aux systèmes colloïdaux concentrés. On peut ainsi caractériser des processus de fragmentation ou d'agglomération. Le couplage potentiel avec des expériences de cisaillement laisse entrevoir la possibilité d'analyser le caractère réversible ou irréversible des déformations appliquées au milieu. Ces techniques optiques semblent prometteuses pour aborder d'importants problèmes industriels tels que les transitions hors équilibres et le vieillissement de la matière molle (évolution des formulations au cours du stockage).

Pour valoriser ces thématiques intéressant l'industrie, outre les collaborations classiques sous forme de thèses, stages post-doctoraux ou consultations, on peut évoquer le cas des unités mixtes de recherches CNRS – Industrie. De tels laboratoires présentent une fragilité intrinsèque du fait des inévitables changements d'orientation industrielle ; c'est la raison pour laquelle la thématique choisie doit être représentative de problèmes de fond qui concernent une majorité des marchés de l'entreprise concernée. S'il est bien entendu que la mission première d'une unité mixte reste la recherche amont, il

est souhaitable que cette entité soit implantée dans un centre de recherche industrielle au sein d'une équipe elle-même au contact de laboratoires d'application. Cette proximité essentielle a pour but de permettre :

- une orientation des thématiques vers les grands défis ;

- un choix de systèmes modèles représentatifs (typiquement basés sur des produits d'intérêt industriel se situant au stade du développement) ;

- une valorisation rapide des acquis fondamentaux dans la mesure où une équipe industrielle locale peut prendre rapidement le relais (validation, dépôt de brevets, structuration par projets) ;

- une fertilisation croisée liée à la pluridisciplinarité de l'environnement (synthèse, procédé, physicochimie et application).

Pour un fonctionnement optimum en termes d'échanges, il faut identifier une thématique scientifique commune à l'ensemble du laboratoire qui puisse répondre à différentes problématiques d'application. Outre sa contribution à l'innovation, une telle équipe mixte joue un rôle clé dans la formation de doctorants sensibilisés aux contraintes industrielles. À une moindre échelle, l'accroissement de l'innovation peut se faire par le détachement *temporaire* dans l'industrie de jeunes chargés de recherches. Dans ce cas de figure il ne faut pas envisager la collaboration sous forme de consultations « larges », mais identifier quelques thématiques clés porteuses. L'implantation dans l'équipe industrielle doit permettre de dégager des modèles et traiter conjointement les problèmes. Le travail en amont s'effectuera par exemple dans le laboratoire d'origine du chercheur par le biais de stages post-doctoraux ou de thèses.

Les instituts de recherche constituent une autre forme de valorisation de la recherche. Il n'en existe *a priori* pas en France qui relèvent du domaine d'activité de la section 15. À titre d'exemple on peut citer en Europe, dans le domaine de la physicochimie de la matière molle, l'« Institute for Surface Chemistry »

(Stockholm – Suède) et le « British Colloid Center » (Bristol – Grande-Bretagne). La mission principale de ces instituts est la mise au point de méthodes de caractérisation et la compréhension de mécanismes physico-chimiques intervenant dans différentes applications. Ainsi l'institut YKI possède un équipement extraordinaire consacré à l'étude des surfaces et est bien sensibilisé aux problèmes d'application et aux attentes du marché. Ces équipes n'ont en général pas de réelle démarche d'innovation en termes de nouveaux produits : ils en laissent le soin aux industriels associés à ces recherches. Ces instituts offrent par ailleurs de nombreuses possibilités de formation pour l'industrie (cours de différents niveaux, formation à l'utilisation de techniques physico-chimiques). Les recherches sont généralement partagées avec les partenaires de l'institut et les informations sont donc accessibles à tous. Dans le cas de l'YKI, des contrats spécifiques entre l'institut et un partenaire industriel peuvent exister, ce qui peut s'apparenter à de la recherche finalisée. Ce type de recherche nécessite de bien connaître les enjeux, les échelles de temps et les évolutions des marchés. Pour ces raisons il est sans doute préférable de la mener en partenariat avec un industriel. La création de « start-up » constitue une autre façon de mener rapidement une recherche finalisée dans un domaine ciblé.

6 – QUELLE PHYSIQUE AU CONTACT DE LA CHIMIE ?

La physique de la matière molle concerne des systèmes organisés à l'échelle mésoscopique par des « forces » moléculaires variées : interaction de Van der Waals, hydrophile-hydrophobe (tensioactifs), stérique (cristaux liquides), entropique (polymères et gels), ioniques (colloïdes, DLVO), ainsi que les forces chimiquement spécifiques telles que la liaison hydrogène et les liaisons chimiques faibles.

Chacun des grands champs classiques de la matière molle ne fait intervenir de manière dominante qu'un nombre très restreint de ces forces et les rôles respectifs de chacune dans la structuration spontanée des systèmes à l'échelle mésoscopique ont pu être étudiés et sont désormais assez bien compris. Sur cette base, on peut envisager d'aborder des situations plus complexes. Pour illustrer une situation où toutes les « forces » concourent à déterminer des fonctions variées et sophistiquées, on peut citer le cas des protéines : la séquence précise des chaînes latérales, qui interagissent entre elles spécifiquement *via* les différentes forces, contrôle complètement le repliement de la chaîne centrale. La structure 3D obtenue de manière univoque détermine en fin de compte la fonction de la molécule. Sans prétendre à court terme atteindre la richesse fonctionnelle des protéines, on peut envisager l'élaboration de molécules de grande taille dont la structure complexe mobilise plusieurs de ces « forces », afin d'accéder à des architectures et à des fonctions sophistiquées. Les tentatives récentes d'attacher des sous unités mésogènes à des copolymères dans le but de réaliser des actuateurs, de même que la mise en œuvre de gels mixtes polyélectrolytes-amphiphiles ioniques déformables sous champ électrique procèdent d'une première démarche dans ce sens. À terme, une étape incontournable sera la maîtrise de la synthèse chimique de molécules complexes. Cette démarche intégrée, qui implique la conception et la synthèse de molécules nouvelles, la caractérisation des structures mésoscopiques et la mise en évidence des propriétés originales des systèmes, impose une réelle coopération entre chimistes organiciens et physiciens de la matière molle. Cette coopération, qui n'a pas atteint à l'heure actuelle l'ampleur souhaitée, devrait être favorisée dans une section telle que la nôtre. Il semble nécessaire dans ce domaine d'avoir une action volontariste de formation réciproque, de façon à ce que chaque milieu puisse acquérir une culture de base permettant de faciliter les échanges ; on peut penser à des écoles d'été pour physiciens, gérées par des chimistes s'intéressant à des domaines très variés tels que les mécanismes réactionnels, les

voies de synthèse récentes, le rôle et les limites de la chimie combinatoire. De la même façon on pourrait imaginer une école du même type pour les chimistes gérée par des physiciens.

Dans un autre ordre d'idées, un effort reste à faire pour mieux comprendre les interactions élémentaires en milieu aqueux. En effet, si les forces de Van der Waals, « stériques » et « entropiques » sont dominantes dans les systèmes apolaires et, de ce point de vue, rendent la situation comparativement simple pour les cristaux liquides thermotropes ou les polymères par exemple, en milieu aqueux, la panoplie des interactions s'enrichit du fait des propriétés exceptionnelles de l'eau : interactions ioniques, interactions hydrophile-hydrophobe, liaison hydrogène, etc. Des phénomènes importants comme l'activité superficielle des ions, classifiée par la série de Hoffmeister, ou le rôle des ions multivalents dans l'interaction entre macro-ions de même charge, commencent tout juste à être élucidés. À longue distance, les interactions s'interprètent bien dans la limite continue en termes de caractéristiques moyennes mais à courte distance, le caractère discret et les spécificités dominent. Ces aspects de spécificité jouent un rôle majeur dans tous les phénomènes de reconnaissance moléculaire en biologie, par exemple et leur compréhension se jouera à la frontière entre les domaines respectifs de la physique et de la chimie.

7 – SITUATION DE LA CHIMIE EN SECTION 15

À cause de l'extraordinaire diversité des systèmes étudiés, l'univers des systèmes moléculaires complexes et des polymères présente une exigence toute particulière vis-à-vis de la chimie qui le rend consommateur et quelquefois acteur des progrès et des moyens de toutes les disciplines du Département des Sciences Chimiques. Il s'agit en fait toujours de chimie à visées applicatives qui devra permettre de construire des objets ou de réaliser des systèmes. Les systèmes complexes

le sont bien assez par leur concept, il est donc nécessaire que la chimie mise en œuvre soit la plus propre, la plus précise, la mieux contrôlée possible. Les besoins concernent tout d'abord la chimie organique, qui peut être relativement classique (encore qu'une synthèse est rarement acquise) ou de haut niveau et souvent utilisée avec des contraintes inhabituelles comme la viscosité, la chimie en dimensionnalité inférieure à trois (chimie confinée sur une surface) ou avec des exigences de sélectivité extrêmes. La polymérisation est devenue un des moteurs du développement de la chimie organométallique et de la catalyse. Les méthodes analytiques adaptées aux systèmes complexes sont aussi à l'origine du développement de nouvelles disciplines analytiques et de nouveaux moyens instrumentaux, souvent en parallèle avec les demandes de la biologie. Enfin la frontière dur-mou qui nous sépare des chimistes du solide est régulièrement franchie sans inquiétude.

Beaucoup de barrières viennent de l'extrême spécialisation de chaque sous-discipline et de la possible méconnaissance des compétences disponibles ailleurs. D'autres obstacles viennent de la faible valorisation des relations interdisciplinaires. Il est très difficile pour un chimiste d'une des disciplines extérieures de faire carrière au sein de la communauté de la section 15, si ce n'est en s'identifiant clairement comme chercheur en chimie. Un chimiste au service de la polymérisation, de l'élaboration de cristaux liquides ou de nouveaux systèmes tensoactifs ne peut pas survivre facilement en tant qu'organicien par exemple, si il est isolé. La conséquence, en dehors de quelques rares rassemblements réussis, est une pénurie permanente des moyens humains de synthèse ; c'est une source de handicap certain pour le développement des idées des chimistes, des physiciens et des physicochimistes. Plus globalement, cela renvoie à l'idée d'une « spécialité » de chimiste du matériau – qui supposerait en fait l'absence de spécialisation.

L'organisation de collaborations interdisciplinaires devrait être le moyen idéal d'une relation harmonieuse entre disciplines complémentaires ; ce qui est en fait le plus

souvent de l'ordre du rêve dans la mesure où ces actions ne sont ni vraiment soutenues, ni vraiment reconnues. La collaboration institutionnelle (programmes régionaux, programmes européens, etc.) se développe d'ailleurs dans un cadre qui

s'oppose, par la lourdeur même de son organisation, aux efforts de création ou d'innovation. Elle conforte la recherche descriptive et explicative, au détriment d'approches plus souples, plus dépendantes des initiatives individuelles.