

Introduction

Les systèmes moléculaires organisés (SMO) résultent de l'auto-organisation des molécules induisant un ordre à longue distance à l'échelle supramoléculaire. Cette auto-organisation repose sur des interactions faibles à courtes distances. Ces systèmes ont été mis en évidence par la conjonction thématique de la physique de la matière molle et de la chimie moléculaire, puis de la biologie et désormais du génie des procédés.

Les systèmes moléculaires organisés constituent un domaine de recherche pluridisciplinaire dans lequel la France représente une contribution quantitative et qualitative (nombre de publications, de prix internationaux, de conférences invitées dans les autres pays du G8) plus importante que le nombre relatif des chercheurs concernés par cette discipline.

L'école française de la « matière molle » ou de la « matière ultra divisée » ou encore des systèmes moléculaires complexes, s'est imposée par des recherches reconnues internationalement qui ont culminé avec les Prix Nobel de Jean-Marie Lehn et de Pierre Gilles de Gennes. Ce sont eux, avec de nombreuses équipes réparties en France, dont l'influence s'est étendue dans le monde entier, qui ont permis de mettre en réseau et d'associer des recherches déjà existantes mais dispersées. Le colloque de 1991 « Systèmes moléculaires organisés : de la matière au vivant » a permis de prendre acte de l'importance de l'interface avec la biologie, de rassembler les acteurs et de générer quelques actions incitatives fortes. Pratiquement, aucun des succès passés (phases pour la transfection génique, nouvelles molécules amphipathiques pour la manipulation des protéines membranaires, économie dans la formulation des émulsions, carburants émulsionnés...) n'aurait été acquis sans un travail fondamental de caractérisation et de compréhension de l'assemblage et de la stabilité des architectures moléculaires impliquées.

L'aller-retour entre les applications et l'aspect fondamental de compréhension des comportements macroscopiques observés, induits par une auto-organisation des molécules dans des structures spontanées, est permanent dans ce domaine de recherches.

Mais les besoins identifiés pour « produire, développer et innover mieux » impliquent aujourd'hui une utilisation industrielle de plus en plus forte des recherches fondamentales sur les systèmes moléculaires organisés.

La maîtrise du site réactif ou catalytique et son impact au plan des matériaux aussi bien polymères qu'inorganiques, la mise en oeuvre de la matière sous forme divisée, la flottation des minerais, le traitement du papier en passant par les émulsions de bitume, la formulation pharmaceutique et l'agroalimentaire sont des exemples qui montrent que les retombées socio-économiques de ces problèmes si variés de l'activité humaine sont de tout premier plan.

Ainsi, dans le domaine de la chimie et de la pharmacie, l'ensemble de ces actions correspondait, en 1998, à 460 milliards de francs de chiffre d'affaires et dans l'agroalimentaire à une part significative des 624 milliards de francs du chiffre d'affaires de ce domaine.

Dans le contexte actuel de compétition internationale, de tels enjeux économiques et leurs implications en termes d'emplois n'appellent plus seulement un intérêt industriel du type « veille technologique » mais un soutien important de l'innovation amont dont l'industrie est tributaire pour sa compétitivité. Ceci nécessite le développement d'une réelle ingénierie moléculaire qui s'appuie sur les profondes mutations conceptuelles et instrumentales récentes des ensembles de la physique, de la chimie, de la biologie et du génie des procédés, constitutifs de la discipline SMO.

En relevant au meilleur niveau international ses propres défis, la communauté scientifique SMO s'implique dans ces divers enjeux industriels.

Par exemple

- la science des matériaux a intégré les acquis de la chimie moléculaire grâce à la généralisation des concepts de la « chimie douce » (terme adopté en anglais) développés par Jean Rouxel et Jacques Livage. La polymérisation inorganique relie déjà trois sous-disciplines de la chimie

la chimie macromoléculaire, la chimie moléculaire et la chimie du solide. Une nouvelle approche des matériaux, riche de perspectives, émerge à ce croisement et permet la maîtrise de l'élaboration de matériaux à fonctions chimiques ou physiques d'organisation contrôlée ;

- la chimie des polymères accède à l'élaboration contrôlée d'ensembles covalents organisés sur de très grandes échelles (100 nm) (cas des dendrimères) comme à la construction de systèmes mésoscopiques par autoassemblage de « nanobriques » préformées ;

- la catalyse hétérogène assimile les concepts de la catalyse homogène ainsi que l'évaluation des supports par les voies de la chimie douce. Avec l'avènement en 1992 des matériaux mésoporeux, elle intègre le domaine des SMO en lui ouvrant des perspectives extraordinaires qui touchent à la physique et chimie dans les milieux confinés, l'organisation de fonctions chimiques pour la catalyse et la catalyse polyfonctionnelle, l'organisation des fonctions physiques permettant d'envisager l'accès à des matériaux intelligents ;

- les réalisations et évolutions récentes de la biologie empruntent avec succès à la physique et à la chimie. On citera (cf. rapport Académie des Sciences RST n° 6 « La chimie analytique », 2000), la mise au point d'analyses à haut débit, à très haute résolution temporelle (femtoseconde 10⁻¹⁵ s) et/ou de très grande sensibilité (femtomole), le développement de procédures d'observation et de manipulation à l'échelle subcellulaire et à celle de la molécule unique, l'explosion des banques de données cristallographiques, l'étude structurale d'assemblages supramoléculaires de dimensions mésoscopiques. Ces évolutions sont le fruit, et ouvrent elles-mêmes, de nouvelles perspectives d'applications dans les domaines thérapeutiques, agrochimiques, cosmétiques... en relation avec le génie des procédés ;

- en génie des procédés, les échelles d'organisation des SMO, typiquement du nanomètre au micron, connues, modélisées et comprises jouent un rôle direct dans les propriétés macroscopiques et laissent prévoir des progrès rapides dans l'optimisation des productions. Cette prise en compte de la complexité des phénomènes physico-chimiques à différentes échelles d'organisation est effectuée par le génie des procédés. S'il permet de concevoir et de contrôler des installations industrielles et/ou d'optimiser les performances pour fabriquer des produits, il doit, en relation directe avec la problématique SMO, leur conférer des propriétés et fonctions d'usage. On parle désormais de génie des produits ;

- les apports de la physique concernent par exemple la compréhension de la multiplicité des échelles spatiales, des milieux hétérogènes, des interfaces, de la fluctuation. Elles sont les assises fondamentales sur lesquelles s'appuient les autres disciplines des SMO. Citons brièvement : l'adhésion, les systèmes multichargés, l'interaction hydrophobe en chimie, les mécanismes coopératifs (organisation en cellules, tissus...) en biologie, les échelles mésoscopiques versus les échelles macroscopiques dans des systèmes inhomogènes ou en présence d'écoulements en génie des procédés. De plus, cette physique SMO impulse et développe les techniques spécifiques à cette discipline qui exige des informations dans une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. L'apparition récente de la microscopie à effet tunnel et de la microscopie à force atomique illustre la révolution apportée à la vision de l'échelle microscopique.

La connaissance de ce domaine que sont les SMO, moteur scientifique de plusieurs disciplines et de paris industriels majeurs, est présentée en quatre chapitres, complétés par des commentaires pédagogiques.

L'aspect chimique est traité sous ses différentes illustrations : chimie de synthèse, matériaux, polymères, catalyse. Le chapitre consacré à la physique des SMO et aux avancées prévisibles dans ce domaine met l'accent sur le développement de nouveaux concepts et de nouvelles techniques permettant l'étude de ces milieux. Le chapitre traitant de l'interface avec le vivant développe les thèmes des associations supramoléculaires, des macromolécules intégrées et des systèmes formulés et vectorisés. Le chapitre sur le génie des procédés donne un aperçu des applications possibles et de leur importance, et souligne le poids économique de la formulation et des procédés.

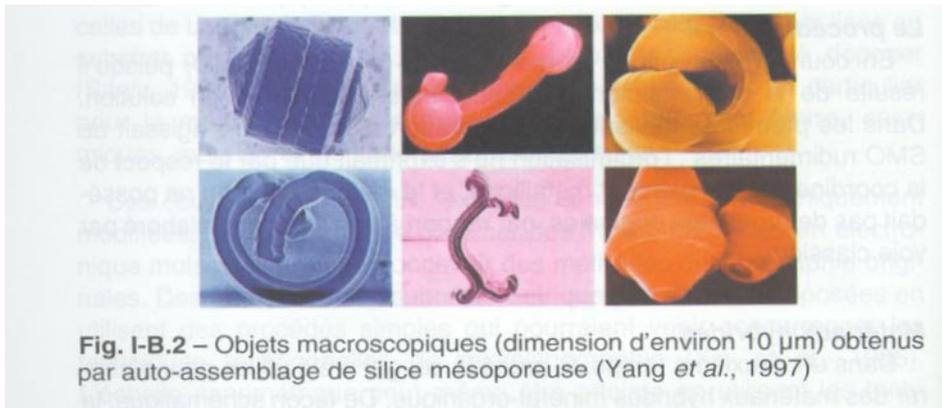


Fig. I-B.2 – Objets macroscopiques (dimension d'environ 10 μm) obtenus par auto-assemblage de silice mésoporeuse (Yang *et al.*, 1997)