

# 05

---

## MATIÈRE CONDENSÉE : ORGANISATION ET DYNAMIQUE

HENRI VAN DAMME

*Président de la section*

RÉMI JULLIEN

*Rapporteur*

Daniel Bideau

Roland Boistelle

Jean-Yves Buzaré

Jean-Jacques Capponi

Bernard Carrière

Alain Couret

Philippe Depondt

Elisabeth Dubois-Violette

Marc-Alain Fontaine

Philippe Goudeau

Jean Lafforgue

Claude Lecomte

Françoise Leroy

Eve-Line Mathé

Robert Mazel

Michel Orrit

Jean-Paul Rivière

Michel Saint-Jean

### INTRODUCTION

Nourrie d'une tradition de cristallographie, la section 05 ne cesse de couvrir un domaine plus vaste. Cet élargissement thématique est principalement dû à l'explosion de la notion même de structure, explosion liée au foisonnement des formes sous lesquelles la matière à l'état condensé se présente au physicien (ou, plus exactement, des formes auxquelles celui-ci s'intéresse) : cristaux, certes, mais aussi quasi-cristaux, couches minces, multicouches, plots, amorphes, verres, gels, granulaires, poreux, agrégats, dispersions, liquides simples ou complexes, assemblées moléculaires, et même... molécule isolée sur un support solide ! Cette matière est étudiée en conditions normales (au sens thermodynamique du terme), mais aussi sous haute densité, à très basse ou à très haute température. Elle est étudiée au repos, mais aussi sous déformation élastique, plastique ou en écoulement visqueux. On l'irradie pour la sonder, mais aussi pour y générer des défauts et ainsi changer ses propriétés.

Parallèlement – et c'est une autre évolution de fond – on assiste à un élargissement des échelles de longueur. L'échelle atomique n'est plus, systématiquement, l'échelle de référence. Les lois d'empilement et, plus généralement, de remplissage de l'espace peuvent être celles d'atomes, de molécules, de colloïdes, de grains ou de cellules (dans une mousse ou un poreux). On étudie la dif-

fusion – simple ou multiple – des ondes par des défauts atomiques, des structures fluides turbulentes ou par des obstacles macroscopiques. La rugosité et la dynamique d'une interface peuvent être étudiées à l'échelle des marches atomiques comme à celle de longueurs capillaires plus macroscopiques. La croissance est certes celle des cristaux (qui reste ô combien importante, notamment en biocristallographie, dans les matériaux pour l'optique et dans d'innombrables processus industriels), mais c'est aussi celle des fronts de solidification, des interfaces fluides ou celle de structures biologiques individuelles.

Enfin, c'est dans les méthodes et les techniques que la diversification se manifeste aussi. Les approches théoriques englobent désormais systématiquement les calculs analytiques et les méthodes numériques de toutes sortes, tandis que les approches expérimentales vont des expériences "de coin de table" à l'utilisation intensive des très grands instruments.

Il va sans dire qu'une telle palette entraîne des recouvrements nombreux avec des domaines thématiques voisins propres à d'autres sections du Comité National : avec la thématique-sœur "Structures et propriétés électroniques" (06) d'abord, pour les matériaux à propriétés semi-conductrices, magnétiques ou supraconductrices ; avec la matière molle (15) ensuite ; mais aussi avec l'optique et plus particulièrement les matériaux pour l'optique (04), les biomolécules (20 et 21), la chimie des interfaces (18), l'élaboration, la caractérisation et la modélisation du solide (19)...

Au risque de paraître déséquilibrer le poids réel des domaines majeurs qui constituent les lignes de fond de notre communauté, nous avons sélectionné les quelques développements suivants qui nous semblent les plus révélateurs de l'évolution conjoncturelle des dernières années :

- Le développement des méthodes numériques, à toutes échelles. Au-delà des succès, il est important de rester lucide et d'être conscient du retard que la communauté nationale se doit de combler au plus vite (et c'est en train de se faire) dans les techniques de dynamique moléculaire *ab initio*, dont la méthode Car-Parrinello est l'arché-

type. Les verres, les agrégats et les cristaux moléculaires sont, dans le champ de la section 05, les domaines actuels privilégiés de ce développement.

- L'évolution de la cristallographie vers la très haute résolution, qui donne accès à la description analytique de la densité électronique et donc, au calcul de nombreuses propriétés. C'est notamment le cas pour les protéines, où l'effort est encore en cours et devrait permettre de faire des progrès importants dans l'étude des interactions protéines-substrat. Le développement de méthodes structurales spécifiquement adaptées aux mésomolécules (quelques centaines de Dalton), parmi lesquelles on trouve de nombreuses molécules importantes pour la biologie, comme les antibiotiques, reste cependant un problème mal résolu.

- L'évolution continue (déjà largement amorcée antérieurement) des études de surfaces et d'interfaces vers des systèmes ou des phénomènes plus complexes : surfaces d'oxydes, surfaces de verre, nanostructures (agrégats supportés, couches ultra-minces, sandwichs, plots...) ; adhésion, adsorption dissociative...

- Le développement d'une physique méso- et macroscopique de la matière en grains, avec une ouverture vers les problèmes géologiques et de nombreux problèmes industriels. La relation entre la (micro)mécanique du contact et le comportement collectif, tantôt de type gazeux, tantôt de type liquide, tantôt solide plastique, est l'enjeu principal.

- Le maintien au meilleur niveau d'une physique de la matière très condensée – solides moléculaires simples ou à liaison hydrogène, solides ioniques et cavalants à très forte pression – dans laquelle la France occupe une place unique, grâce à un petit noyau de chercheurs fortement liés aux très grands instruments.

- La multiplication des études sur les systèmes confinés : cristaux liquides au voisinage d'une paroi, thermodynamique et dynamique moléculaire des liquides dans les poreux ou dans les poches protéiniques, sandwichs magnétiques...

- Le renouveau des études à l'interface de la physique et de la mécanique. L'étude *in situ*

(microscopie électronique, topographie) des déformations plastiques et leurs simulations numériques à l'échelle mésoscopique sont des fleurons de la science française, partagés avec le Japon. La physique de la fracture fragile ou ductile se renouvelle aussi profondément, en bénéficiant à la fois de l'apport de la physique statistique et des méthodes de champ proche.

- L'attaque frontale des problèmes liés à la diffusion multiple, qui a perdu son statut d'épouvantail. On s'y attaque désormais sur de nombreux systèmes, en particulier dans le cas des ondes acoustiques où on en a fait un outil maîtrisé.

- La multiplication d'études sur objet unique, notamment – mais pas uniquement – à l'interface physique-biologie et grâce notamment aux techniques de champ proche et de manipulation fine (pincettes optiques) : on fait de la spectroscopie de molécule seule sur un support, on étudie les propriétés mécaniques d'une seule macromolécule, on mesure la force entre une surface et un grain colloïdal, on étudie la conductivité d'un seul nanotube de carbone...

- La physique des objets et des fonctions biologiques, précisément, en complément à la biocristallographie, est en passe de devenir un domaine majeur, même si le nombre d'équipes impliquées est encore faible et même si le couplage avec les biologistes est encore imparfait. L'élasticité de l'ADN, les transferts transmembranaires, la mécanique du cytosquelette, la reconnaissance moléculaire ou cellulaire et la morphogenèse sont, pour l'instant, les sujets qui ont émergé. Néanmoins, l'exploration de l'ADN et de sa réplication comme outil de calcul et de sélection ("DNA computing"), qui explose aux États-Unis, est encore absente en France.

Enfin, et de manière transversale, on ne saurait passer sous silence l'impact – déjà énorme mais encore croissant – des sources de neutrons et des sources de photons d'énergie continûment ajustable, de polarisation accordable, avec des hauts flux exceptionnellement collimatés, cohérents dans un volume appréciable, sur presque tous les sujets évoqués ci-dessus et d'autres qui n'ont pas été mentionnés (dynamique des verres et des biomacromolécules, lithographie...).

# 1 - SYSTÈMES DÉSORDONNÉS OU À ORDRE PARTICULIER

## Milieux hétérogènes macroscopiques

Une grande activité se développe actuellement, notamment en France (grâce à un GDR) sur la physique des milieux hétérogènes complexes, ce qui recouvre essentiellement les milieux granulaires secs (poudres) ou humides (pâtes et suspensions), les écoulements dans les milieux poreux et certains problèmes de mécanique (formation et propagation de fractures, localisation de déformations...). Dans les milieux granulaires, des comportements inhabituels, ni solides, ni liquides, tels que les avalanches, les formations de voûtes, les phénomènes de ségrégation par écoulement ou par vibration, etc. intéressent les physiciens de la matière condensée qui cherchent à en donner des descriptions basées sur des modèles simples. De même, dans les systèmes poreux et dans les suspensions, les rapports entre organisation spatiale de la matière et les propriétés sont encore mal connus. Il s'agit d'une thématique très large qui fait appel à différentes disciplines : physique, mécanique, hydrodynamique, chimie... On constate même des ouvertures vers des problèmes géologiques, voire biologiques. Il s'agit d'une physique méso- ou macroscopique, où les échelles de longueur sont essentiellement supérieures au mm, et où les interactions "locales" (surtout en granulaire sec) sont mal connues. Ceci explique que les développements récents doivent beaucoup à l'explosion des moyens et des méthodes numériques, et celle des outils de caractérisation adaptés aux échelles de longueur et de temps mises en jeu (caméra rapide et traitement d'images, émission acoustique...) qui devraient encore se développer. Il n'y a pas vraiment eu de découvertes fortes durant ces vingt dernières années. Simplement, sur la base de modèles venus essentiellement de la physique statistique, la prise en compte explicite du désordre dans les milieux hétérogènes a constitué un virage important, facilité par le développement des techniques numériques et expérimentales. Les avancées expérimentales et

numériques sont certaines, voire spectaculaires, et l'interprétation sur la base de modèles théoriques récents (percolation, fractales, agrégation...) est très pertinente. L'effort théorique a porté sur une adaptation de la théorie cinétique pour les écoulements granulaires rapides, une théorie thermodynamique des poudres développée par S. Edwards (Cambridge, UK), une description à deux variables couplées introduite récemment par J. P. Bouchaud et P. G. de Gennes pour les écoulements de surface, des essais avortés pour adapter la théorie des phénomènes critiques auto-organisés (Self-Organized Criticality) à l'explication des avalanches, des théories analytiques de faible concentration pour les suspensions (à la suite des travaux de Batchelor et Acrivos). Ces thèmes explosent au niveau international, à en croire notamment l'expansion de la nouvelle revue américaine *Physical Review E*, en partie à cause de leurs intérêts en applications. Ceci explique que ce sont des thèmes sujets à polémique (SOC ou pas, interprétations contradictoires des mécanismes de ségrégation, etc.).

## Suspensions de particules

La physique des suspensions à petit nombre de Reynolds est ancienne. Les théories analytiques ont bénéficié des méthodes d'analyse statistique mais ne traitent que les faibles concentrations. Dans ce domaine, on assiste également à l'émergence de simulations numériques imposantes. Du point de vue expérimental, de nouvelles techniques d'analyse permettent des mesures précises (vitesse, concentration). Le traitement numérique des images, RX, ondes acoustiques, est largement utilisé. L'utilisation de la RMN devrait être développée en France. Il reste à faire des efforts sur les systèmes concentrés, les particules non sphériques (fibres et plaquettes), les particules polydisperses, la déformation des particules en mouvement pour toutes les gammes de nombres de Reynolds.

L'étude des fluides électrorhéologiques (suspension de colloïdes avec interactions dipolaires) et des fluides magnétorhéologiques, s'est développée, mais un effort en physico-chimie pour développer ces systèmes et améliorer leurs performances est nécessaire. De même, la modélisation des écoule-

ments turbulents de suspensions reste à faire. Les lits fluidisés (suspensions en écoulement contraire à la gravité) sont intermédiaires entre les suspensions avec un fluide visqueux entre les grains et les écoulements granulaires secs. La théorie est récente, l'équation de base utilisée est du genre Navier-Stokes pour les systèmes diphasiques. Cependant la description générale reste à faire.

## Systèmes quasi-périodiques

Malgré la différence intrinsèque du point de vue de la structure entre différents types de systèmes quasi-périodiques comme les incommensurables modulés, les incommensurables composites et les quasicristaux, il existe une approche commune de leurs symétries. Un effort considérable portant sur l'étude des systèmes modulés, possédant un réseau de base, donne maintenant une bonne compréhension tant des aspects structuraux que dynamiques associés. Différentes descriptions interprètent les comportements caractéristiques de ces phases (branche de fluctuation de phase, transition d'ancrage, forme de la modulation, rôle des défauts, aspects métastables...). Depuis la découverte des quasicristaux, caractérisés par l'absence de réseaux périodiques de base, une très grosse activité tant expérimentale que théorique existe, apportant des résultats très importants mais révélant simultanément l'extrême complexité du sujet. Parallèlement, les structures composites, constituées de deux, ou plus, réseaux de base imbriqués intermodulés, apparaissent intermédiaires dans leur complexité. Par analogie avec les quasicristaux, ces structures existent à toutes les températures par construction de l'édifice cristallin. En commun avec l'ensemble de ces structures quasipériodiques, une description de superspace recrée une périodicité dans des dimensions supérieures. L'étude des caractéristiques structurales dynamiques, voire électroniques, doit constituer une ouverture vers la compréhension des systèmes quasicristallins. L'interdisciplinarité entre physique et chimie du solide peut jouer un rôle majeur sur ce sujet, de nouveaux matériaux étant à concevoir.

## Systèmes vitreux

L'étude des verres et des systèmes vitreux s'est surtout développée d'un point de vue fondamental. L'étude théorique des relaxations lentes dans les verres de spins a fait beaucoup de progrès, mais son application aux verres réels pose de nombreux problèmes. Des efforts sont toujours portés sur l'étude de la structure des verres par EXAFS, neutrons, RMN dans le solide et le liquide surfondu. De gros efforts ont été faits dans la maîtrise du processus sol-gel et l'étude expérimentale, ainsi que la modélisation des propriétés remarquables de certains précurseurs du verre comme les aérogels. D'autre part, l'investigation expérimentale des excitations de basse fréquence dans les verres est toujours d'actualité mais un effort théorique reste à faire. Les simulations numériques, notamment par dynamique moléculaire, font beaucoup de progrès, non seulement pour étudier la structure, mais aussi pour analyser les mécanismes de la transition vitreuse (qui reste encore un problème fondamental très ouvert) ; à noter aussi des simulations de propriétés thermomécaniques. Une autre étude fondamentale importante concerne les mécanismes de recristallisation (ou "dévitrification"). À l'échelle mésoscopique, les études fondamentales sur les verres peuvent rejoindre les problèmes de physique et de mécanique des milieux hétérogènes : structure de la matière première (taille des grains, homogénéisation), mécanique de la laine de verre, transferts thermiques dans la matière première... Enfin l'étude de la surface du verre est d'un grand intérêt pour les applications.

## 2 - SURFACES ET INTERFACES

Il s'agit d'une thématique en fort recouvrement avec la section 6, car de nombreuses surfaces et/ou interfaces sont préparées et/ou caractérisées en vue de leurs propriétés semi-conductrices, supraconductrices ou magnétiques mais des recouvrements existent aussi avec des sections de chimie (catalyse), les sections d'électronique (surfaces semi-conductrices pour l'optoélectronique), etc. Il s'agit d'une activité en plein essor car aux techniques tra-

ditionnelles d'investigation (notamment la cristallographie) viennent s'ajouter les énormes possibilités des grands instruments ainsi que les techniques récentes à champ proche.

### Structure des surfaces et interfaces

Une activité toujours importante concerne l'étude de la structure atomique des surfaces : caractérisation des défauts structuraux et leur influence sur les propriétés électroniques et chimiques. Une autre activité en expansion concerne les études dynamiques : mouvements de marches et défauts, diffusion d'atomes. En ce qui concerne les connaissances en structure électronique des surfaces, il faut noter un gros effort théorique, notamment par le développement des méthodes numériques. Des activités qui commencent à se développer et qu'il faudra stimuler concernent les surfaces des verres et des oxydes ainsi que les interactions des atomes et des molécules avec des surfaces.

En ce qui concerne les interfaces semi-conductrices, il faut noter les études d'interfaces modèles, comme Si(111)(1x1)-H-métal, de films magnétiques en épitaxie sur des surfaces semi-conductrices, de couches diélectriques en épitaxie sur le silicium (minimisation des défauts d'interface), d'hétérojonctions de semi-conducteurs (comme les transistors bipolaires en relation avec les applications en optoélectronique), d'hétérostructures à base de nouveaux matériaux (grands gaps, GaN, AlN, etc.)

### Nanostructures en surface et couches minces

Une activité fondamentale concerne les évolutions morphologiques pendant la croissance des surfaces, notamment l'évolution des paramètres lors de la croissance de matériaux désaccordés ou la formation spontanée de nanostructures. Ces études nécessitent des mesures en temps réel et sont donc liées notamment au développement des techniques optiques.

Il faut aussi noter le développement prometteur des techniques de nano- et microlithographie

ainsi que la manipulation d'atomes en surface, avec toutes leurs applications intéressantes pour l'électronique. Plus généralement se développe toute une série d'études sur des surfaces "modifiées" : agrégats supportés, alliages de surface, nanostructures...

Les couches minces (et ultraminces) métalliques ou semi-conductrices déposées sur des métaux, des semi-conducteurs ou des isolants constituent toujours des systèmes et des matériaux modèles dont l'étude fondamentale est stimulée par les possibilités d'applications.

### **Phénomènes de croissance**

Les études des corrélations entre croissance, structure et propriétés macroscopiques des surfaces sont toujours en pleine activité et sont à l'origine d'une interaction fructueuse entre expérimentateurs et théoriciens. À noter la caractérisation des différents modes de croissance, en particulier lors des premiers stades, les mécanismes de l'épitaxie et la formation de phases métastables, l'étude de l'interdiffusion (formation d'alliages de surface). L'étude de la structure électronique est aussi très active, stimulée par des prédictions théoriques sur les états quantiques à deux dimensions.

### **Propriétés des surfaces**

L'influence de la dimension des objets sur leurs propriétés physiques est le moteur des études les plus actuelles sur le magnétisme des surfaces et des interfaces, qu'il s'agisse de la réduction de dimensionnalité perpendiculairement aux couches minces (superréseaux métalliques) ou latéralement (plots magnétiques). Les études des propriétés magnétiques particulières de tels objets, et parallèlement de la croissance et de la structure des entités élémentaires des superréseaux (couches ultraminces et sandwiches) et de la morphologie des couches épitaxiées connaissent un important développement et font appel à la fois aux techniques du rayonnement synchrotron (dichroïsme magnétique, imagerie magnétique) et de microscopies en champ proche. Dans ce domaine, l'effort instrumental doit être soutenu.

Les études de réactivité de surface, quand elles sont faites en liaison avec la structure et la dynamique, sont aussi du domaine de la section 5. Ainsi les problèmes d'adhésion et de collage, les modes de vibration en surface, les propriétés catalytiques simples, l'adsorption moléculaire et dissociative sont des sujets en pleine expansion. À noter aussi l'influence des défauts sur la réactivité dans le cas de surfaces "réalistes" ou les problèmes de réactivité d'agrégats supportés (compétition entre leur structure et leur taille) dans le cas de surfaces "modifiées".

## **3 - PHYSIQUE DE LA MATIÈRE MOLLE**

Ici certains sous-thèmes émergent sur d'autres sections, notamment la section 15 (c'est le cas des polymères, entre autres). Au cours du temps, on a assisté graduellement à une certaine convergence entre des thématiques qui étaient assez distinctes au départ ; polymères, colloïdes, cristaux liquides. Il apparaît un peu difficile de classer ces thèmes en catégories distinctes, car, de plus en plus, ce sont des systèmes mixtes qui sont étudiés à l'heure actuelle. C'est le cas par exemple des polymères mésomorphes, qui cumulent des propriétés des polymères et des cristaux liquides, des assemblages de copolymères, pour lesquels les affinités diverses pour des solvants ont été mises à profit pour fabriquer des systèmes colloïdaux.

### **Cristaux liquides**

La compréhension globale des cristaux liquides thermotropes est assez bonne. L'étude des phénomènes d'ancrage, approche microscopique et observations diverses (microscopie en champ proche, infra-rouge en réflexion...) est actuellement largement développée dans la communauté française. Les interactions solide/cristal liquide restent néanmoins encore à explorer, notamment pour comprendre l'organisation des cristaux liquides en géométrie confinée. La microscopie en champ

proche et la spectrométrie infra-rouge devraient être des outils intéressants. La compréhension et la maîtrise de l'ancrage ont une grande importance pour les applications industrielles.

Dans beaucoup de phases, le rôle de la chiralité est fondamental : cela s'est révélé en particulier dans les phases smectiques à joints de grain (TGB, TGB C) découvertes en France. L'analogie entre ces phases et les supraconducteurs a été étayée par l'observation d'une phase liquide de dislocations comparable à celle des vortex de supraconducteurs de type II. Le problème de la commensurabilité des phases TGB reste ouvert.

L'étude des films smectiques (libres ou non) s'est développée récemment, et en particulier celle de films avec incorporation d'objets biologiques : virus, protéines et ADN, avec pour objectif leur manipulation, cristallisation et congélation (intérêt biologique).

## **Systèmes moléculaires organisés**

Ce domaine comprend les amphiphiles, les tensioactifs, les membranes fluides et les microémulsions. L'évolution de ces dix dernières années a concerné la compréhension des systèmes amphiphiles simples en terme de transformation de la morphologie des agrégats avec une description géométrique où le rôle de la courbure est démontré. Un grand nombre de phases ordonnées et désordonnées ont été caractérisées. Une description cristallographique des films d'amphiphiles ou de systèmes plus complexes a été donnée. Il reste à développer dans les systèmes lyotropes l'étude des fluctuations (de la phase ou prétransitionnelles) statiques et dynamiques. Pour accéder à ces fluctuations, il faut disposer de monodomains qui peuvent être obtenus en mettant des systèmes sous contrainte (cisaillement par exemple). L'étude de la relaxation sous contrainte vers un "état d'équilibre" devrait également donner des informations sur ces systèmes.

Actuellement plusieurs groupes abordent la physique des systèmes mixtes amphiphiles/hôtes. Cela correspond à des situations plus complexes où les agrégats amphiphiles (micelles géantes, membranes fluides) interagissent avec des molécules

hôtes (polymères, macromolécules, colloïdes). Ces études laissent entrevoir des perspectives ouvertes vers des systèmes biologiques.

En ce qui concerne les systèmes tensioactifs, on a, depuis dix ans, assisté à une évolution profonde de la compréhension des structures et de la thermodynamique des systèmes auto-organisés du type tensioactifs en solution. L'élément primordial est la compréhension du comportement des structures en terme de compétition entre élasticité de courbure du film et entropie. Trois types d'organisations ont été particulièrement étudiés : les phases lamellaires (mise en évidence des interactions d'ondulation), les phases éponges et les phases de micelles vermiculaires. La compétition entre la structuration de l'espace lié aux tensioactifs et les interactions entre particules doit conduire à des comportements originaux de composites liquides.

Les films de Langmuir ou Langmuir-Blodgett ont été également largement étudiés. Cette activité s'est développée en France grâce à un GDR. Les axes importants ont concerné l'étude des structures bidimensionnelles, les phénomènes de cristallisation et l'organisation des films autoassemblés. Ici encore, une ouverture vers l'incorporation de systèmes biologiques devrait se faire.

## **Rhéophysique des fluides complexes**

C'est un domaine en pleine expansion où la relation entre la structure et l'écoulement est déterminée à l'aide d'observations utilisant les techniques classiques : diffraction, diffusion des rayonnements (RX, neutrons, lumière). La transformation de structures sous cisaillement (cristaux colloïdaux, phases lyotropes...) et l'étude de la cinétique doivent donner des informations sur l'organisation des phases. La formation dynamique d'états métastables sous contrainte doit être étudiée. Ces études devraient déboucher sur des interprétations microscopiques, utilisant la physique statistique, des propriétés rhéologiques des fluides complexes. Actuellement, il y a une ébauche de collaboration, qui devrait être enrichie et encouragée entre les rhéologues et les physiciens. L'action d'un champ de vitesse sur les polymères aux interfaces est un sujet neuf et prometteur.

## Polymères

De façon générale, la physique des systèmes moléculaires et polymériques aux interfaces constitue une direction de recherche nouvelle et importante. La structure et la dynamique des polymères greffés ou déposés sur des substrats solides en est un thème majeur. Les situations de confinement dense de polymères sont nombreuses. La nature du confinement peut être variée ; adsorption, greffage, réticulation (réseaux), ségrégation (blocs copolymères), pores. Les axes de recherche privilégiés concernent le confinement anisotrope (polymères aux interfaces) ou le confinement isotrope en présence de déformation (réseaux et systèmes amorphes, semi-cristallins étirés). Les techniques de DSC, RX, neutrons, permettent d'avoir accès aux paramètres structuraux et par la RMN à la dynamique locale. L'étude de la dynamique des polymères aux interfaces est importante pour la compréhension des propriétés de surface de films minces : phénomènes de mouillage, adhésion. Les études du fluage des polymères et des effets dus à la présence de l'eau sont étudiés. Récemment, l'étude des polymères diblocs et triblocs s'est beaucoup développée, et le polymorphisme de ces phases s'est révélé impressionnant.

## Interface physique-chimie

L'interface physique-chimie a été favorable aux deux communautés. Cela a été particulièrement vrai dans le domaine des cristaux liquides où les collaborations sont établies depuis longtemps. Les illustrations foisonnent : découverte des cristaux liquides ferroélectriques, cristaux liquides polymériques, cristaux moléculaires conducteurs unidimensionnels, matériaux moléculaires ou polymères ferroélectriques à forte polarisation dans la chaîne principale, réalisation de nouvelles familles de cristaux liquides à liaison H et avec cages ioniques. La richesse des assemblages de copolymères est remarquable, et la chimie de la chiralité a permis la mise en évidence de nombreux systèmes complexes très intéressants. Bref, l'interface physique-chimie s'est construite avec le temps et sur la base de relations personnelles, et elle existe de façon vivante et convaincante. C'est un grand succès dont il faut tenir compte pour aborder des situations analogues dans d'autres domaines.

## Interface physique-biologie

L'interface physique-biologie n'en est, quant à elle, qu'à ses balbutiements. La biologie cellulaire se développe actuellement rapidement et deviendra dans un temps assez court l'un des axes majeurs du développement scientifique. Si les biologistes ont intégré les outils de la chimie (biologie moléculaire), la physique reste cependant plus éloignée de leur culture. Il est indispensable de favoriser les transferts réciproques des connaissances entre physiciens et biologistes.

Deux voies de collaboration sont possibles. D'une part les physiciens utilisent des systèmes biologiques comme systèmes expérimentaux leur permettant de développer des concepts théoriques. Cette voie a le mérite d'utiliser les compétences de chaque communauté. Dans cette optique, une remarque initiale s'impose aux physiciens qui doivent considérer qu'ils ne feront progresser la biophysique que s'ils peuvent faire des études quantitatives des fonctions biologiques. Mais, d'autre part, les physico-chimistes apportent directement un "outil" (technologie, instrument) aux biologistes qui leur permet de faire des progrès rapides dans leur domaine. Dans cette deuxième approche, la rencontre biochimistes-physiciens semble s'être réalisée entre autres grâce aux outils tels que la microscopie à champ proche. Les méthodes d'observation et de mesure sur les molécules d'ADN (mesures de forces, mesures par pinces optiques) et les manipulations très fines sur une molécule d'ADN (traction, enroulement) semblent avoir réveillé l'intérêt de quelques biologistes. Un des enjeux lié à ces approches concerne la cartographie du génome (alliance de manipulations par greffage chimique de sondes colorées et outils pour mesures physiques). Les techniques de peignage de l'ADN participent à cette démarche. Un autre exemple concerne la fabrication de structures multilamellaires pour leur utilisation dans la vectorisation de l'ADN.

L'analyse des structures cristallographiques des macromolécules biologiques en relation avec leur fonctionnalité (protéines, enzymes) s'est développée de façon spectaculaire. Les études concernant les interactions protéine-protéine, leur structuration ou leur dénaturation sont des thématiques très dif-



ficiles, mais fondamentales, nécessitant un réel effort. De plus, toute étude cristallographique demande un échantillon cristallin macroscopique : d'où l'importance d'une approche physique et physico-chimique de la croissance cristalline des biomolécules (cristallogénèse). Ainsi l'obtention de cristaux millimétriques permettra des études de diffraction aux neutrons et la localisation des atomes d'hydrogène, données fondamentales pour la caractérisation neutre ou ionique de certains résidus d'acides aminés. De plus, ces cristaux de qualité permettent aussi l'étude des structures à très haute résolution conduisant à l'estimation de mouvements de blocs rigides, du potentiel électrostatique de petites protéines (effort mené au niveau international, utilisant les centres synchrotrons à Hambourg, Daresbury, Brookhaven, ESRF).

Les techniques de cryo-microscopie jouent également un rôle fondamental. Le rôle de l'eau dans la structure et l'activité des molécules biologiques, et en particulier le comportement de l'ADN (polyélectrolyte) en solution, méritent d'être approfondis. Cette activité se développe actuellement. L'étude de l'ADN fait référence à des domaines bien répertoriés de la physique molle : cristaux liquides, amphiphiles, colloïdes, polymères et polyélectrolytes. La description (géométrie, défauts) de ces différentes phases condensées en est un bel exemple. Le lien avec la biologie doit se faire par la compréhension de la relation entre l'organisation supramoléculaire de l'ADN et son activité fonctionnelle. Les problèmes de dynamique commencent à être abordés, et récemment la dynamique de condensation et décondensation d'une chaîne d'ADN linéaire a été suivie par fluorescence. De façon plus générale, l'étude des matériaux biomoléculaires condensés, qui concerne les biologistes, chimistes et physiciens, devrait mener à la compréhension des réactions biologiques et être à la base d'applications dans le domaine de la thérapie génique (processus de vectorisation). Certains enjeux demeurent et commencent à être abordés : compréhension méso-scopique de l'activité cellulaire, de la motilité cellulaire, de la dynamique du cytosquelette (microtubules, centrosome), du processus de division cellulaire (mesures de constante élastique).

## 4 - HYDRODYNAMIQUE

C'est un domaine où une avancée sensible s'est fait sentir ces dix dernières années ainsi qu'un élargissement des concepts de base utilisés en hydrodynamique à d'autres disciplines.

### Hydrodynamique non linéaire

Les équations d'amplitude – qui dégagent l'essence des mécanismes et qui sont à l'hydrodynamique ce que les équations de Ginzburg-Landau sont aux transitions de phases – sont maintenant bien intégrées dans la communauté des hydrodynamiciens. Par contre, leur extension pour l'étude d'autres systèmes est récente et a permis la découverte de divers mécanismes non linéaires qui pilotent la dynamique des fronts, les phénomènes de croissance cristalline, la taille des dendrites, la fracture, le froissage et la morphogénèse.

Dans le domaine de l'hydrodynamique non linéaire, des instabilités et de la transition à la turbulence, ces dernières années ont vu s'opérer un rapprochement entre les communautés de physiciens qui étudiaient surtout des systèmes fermés (convection, Taylor-Couette, physique des petites boîtes...) et les mécaniciens plus tournés vers l'étude des écoulements ouverts (sillages, grande soufflerie...).

Actuellement, les approches par équations d'amplitude pénètrent la communauté des mécaniciens, en permettant de comprendre l'essence des mécanismes d'instabilité : l'effet du transport vers l'aval des perturbations. Et l'on voit également aujourd'hui des laboratoires de physique s'équiper d'expériences "ouvertes" pour étudier l'effet du transport vers l'aval, modes globaux dans les sillages...

Il est raisonnable de penser que cette ouverture réciproque va continuer à faire progresser la compréhension de ce type d'écoulement et commencera bientôt (si ce n'est déjà fait) à induire des applications à des écoulements réels, aéronautiques ou industriels. Ce rapprochement devrait aussi permettre une progression plus harmonieuse des études visant à comprendre la turbulence.

## Étude de la turbulence

Les développements notables en dynamique non linéaire des systèmes à petit nombre de degrés de liberté concernent essentiellement le problème du contrôle du chaos et reposent sur des méthodes intelligentes d'asservissement tirant parti des caractéristiques du système lui-même. Pour les systèmes à grand nombre de degrés de liberté, l'étude de la transition vers le chaos spatio-temporel a mis l'accent sur ses aspects universels, rejoignant la problématique de la matière mal condensée (paramètres d'ordre, équations d'enveloppe, défauts, etc.). Les études futures devraient déboucher sur l'extension de ces descriptions à des situations plus complexes, telle la transition directe vers la turbulence dans certains écoulements hydrodynamiques classiques (Couette et Poiseuille).

La découverte du chaos a eu un impact important dans tous les domaines où une dynamique est en jeu. La liste est longue. L'impact est conceptuel et méthodologique ; il a d'ailleurs largement dépassé les frontières de la physique.

Les années passées ont enregistré des progrès importants dans la connaissance de la turbulence développée et des processus qui s'y rattachent. D'un côté, sur le plan statistique, il a ainsi été montré sans ambiguïté que les fonctions de structure du champ de vitesse vérifiaient une loi de crossover au voisinage de la coupure entre échelles inertielles et échelles de dissipation. La mise en évidence de la structuration de l'écoulement pleinement turbulent par des filaments de vorticité qui se forment, perdurent, puis se désagrègent selon un mécanisme d'éclatement tourbillonnaire constitue le pendant physique des observations statistiques. Le rôle joué par les défauts a été bien répertorié. L'exploitation de ces propriétés ouvre de nouvelles perspectives sur la théorie de l'intermittence en régime inertiel et les corrections aux lois de Kolmogorov.

Dans ce domaine, le mode de production s'est modifié ces dernières années. Les progrès résultent souvent d'une interaction entre la simulation (modèles) et l'expérience. Toutefois une séparation subsiste entre les deux activités : l'instrumentation utilisée par les expérimentateurs et la simulation utilisée par les numériciens. En ce qui concerne la

turbulence, on attend encore beaucoup de la simulation numérique pour la modélisation. Les développements d'analyse, nouveaux capteurs notamment, contribuent de façon notable aux progrès.

## Interfaces disciplinaires

Dans ce domaine, la pratique de l'interdisciplinarité est ancienne et même sans doute en légère augmentation. Les communautés impliquées sont variées. Les relations entre mathématiciens et physiciens existent depuis longtemps sur les systèmes dynamiques et se sont illustrées récemment par l'étude des fronts. Le "thème" du trou d'ozone met en jeu une interdisciplinarité active entre chimistes et physiciens de la turbulence, celui des fronts celle entre mathématiciens et physiciens, celui de l'océanographie celle entre océanographes et dynamiciens des fluides, celui de la croissance cristalline celle entre métallurgistes et physiciens.

Par contre, la communauté de la géophysique externe ou celle de l'astrophysique, qui s'intéressent à des systèmes où la turbulence joue un rôle important, sont sans doute en attente de modèles physiques de la turbulence permettant d'aborder des situations complexes. Même remarque pour l'industrie, qui met souvent en œuvre des écoulements turbulents complexes comme les écoulements multiphasiques. Il semble que les systèmes où les morphologies complexes apparaissent sont également en attente de nouveaux concepts permettant d'appréhender ces phénomènes.

L'avancée des connaissances peut être stimulée par des progrès en mathématique (par exemple les théorèmes d'existence ou d'inexistence de solutions des équations d'Euler, des résultats sur la structure des attracteurs étranges), en mathématiques appliquées (les singularités des équations de Navier-Stokes, la dynamique d'interface, les fractales), ou en instrumentation (la réalisation de nouveaux capteurs). Sur le plan numérique, le domaine mobilise en permanence les nouvelles possibilités offertes par les ordinateurs. On ne peut cependant pas parler de situation d'"attente".

## 5 - MATÉRIAUX CRISTALLINS, DÉFAUTS, MICROSTRUCTURES ET PROPRIÉTÉS

### Les progrès de la cristallographie

L'arrangement détaillé des atomes à l'échelle microscopique et mésoscopique est nécessaire à la compréhension de l'optimisation des propriétés physiques des matériaux (magnétisme, supraconductivité, piezolélectricité, ferroélectricité, porosité...). La diffraction à très haute résolution donne accès à la densité électronique et aux propriétés électrostatiques des matériaux cristallins. Le développement de telles méthodes nécessite des expériences de diffraction de plus en plus fines sur site synchrotron (multi-longueur d'onde, DAFS, diffraction sous pression, sous-champ électrique, mesure de la densité électronique d'états excités) utilisant les nouvelles technologies comme les détecteurs 2D, "imaging plates" ou CDD... d'où un énorme travail concernant les traitements des données. Malgré la qualité des données (sur poudres ou monocristaux), de nombreux problèmes méthodologiques subsistent en ce qui concerne le phasage des facteurs de structure (mise au point de méthodes pour résoudre *ab initio* les structures de 150 atomes ou plus, méthodes plus performantes pour les protéines...).

### Influence des défauts cristallins sur les propriétés mécaniques

Un objectif est d'expliquer les propriétés mécaniques des matériaux par le comportement microscopique des défauts. Dans ce domaine, l'école française est incontestablement en première ligne. Sa force est en partie due à ce qu'elle possède des spécialistes leaders au niveau international de quasiment toutes les approches : structure au niveau atomique des défauts par microscopie électronique (haute résolution et faisceau faible) et simulation, arrangement des dislocations dans des

échantillons déformés par microscopie électronique *post mortem* et par topographie aux RX, structure et mobilité des dislocations sous contrainte et en température par déformation *in situ* dans le microscope électronique, déformation macroscopique fine, simulation à l'échelle mésoscopique, modélisation. Une innovation expérimentale récente est le développement d'une machine de déformation *in situ* dans un microscope de proximité. On peut souligner comme originalité française la déformation *in situ* où les Français sont les leaders et la simulation mésoscopique lancée en France au cours des cinq dernières années qui s'avère très fructueuse. La communauté française concernée a, au cours des dix dernières années, diminué de volume pour atteindre une taille qui semble convenable. Pour les années futures, il apparaît crucial d'amorcer le renouvellement du potentiel de théoriciens et de maintenir le savoir-faire technique dans certains laboratoires. Enfin, on peut souligner que cette communauté française s'est quelque peu organisée essentiellement grâce à son colloque annuel sur la plasticité, toujours bien vivant. D'autre part, l'interdisciplinarité existe entre physiciens du solide, chimistes et une frange des mécaniciens.

Les sujets développés sont soit d'essence fondamentale, soit fournis par les industries aéronautique ou aérospatiale (parfois des semi-conducteurs). Il faut souligner que, dans ce deuxième cas, des problèmes fondamentaux très intéressants peuvent être traités de façon propre. L'activité est majoritairement concentrée sur les matériaux métalliques, celle sur les céramiques se maintient à un niveau relativement faible. Les spécialistes des semi-conducteurs sont en train de s'orienter vers les matériaux multicouches. Leurs connaissances des défauts et des interfaces doivent apporter des réponses à des problèmes rencontrés dans ces matériaux. Plusieurs problèmes physiques d'actualité peuvent être identifiés. L'étude de la structure et de la dynamique des dislocations dans des matériaux monophasés est toujours d'actualité dans les matériaux à structure complexe (alliages, céramiques).

Le développement de matériaux de faible dimensionnalité (matériaux à petits grains, multiphasés ou multicouches) a généré des recherches sur la nature et le rôle des joints de grains et des

interfaces ou interphases, et a remis au goût du jour l'étude de certains concepts tels que la distribution des contraintes, la germination et la multiplication des dislocations, les interactions entre dislocations et surfaces, interfaces, précipités... Dans tous les matériaux monophasés ou polyphasés, il s'agit de comprendre et de modéliser les propriétés mécaniques : limite d'élasticité, durcissement, fragilité, rupture, endommagement, comportement en fluage et en fatigue. La modélisation des propriétés mécaniques à l'échelle mésoscopique et microscopique est un sujet en plein essor.

### **Irradiation et implantation**

Un autre objectif du domaine est de comprendre la modification des microstructures par irradiation et implantation. Les mécanismes physiques de base de déplacement atomique par chocs élastiques sont bien compris et modélisés, à l'exception des effets collectifs observés dans les cascades de déplacements denses. Les simulations numériques par dynamique moléculaire ont eu un rôle important puisqu'elles ont permis de suivre en temps réel le développement temporel d'une cascade de déplacements. Ces méthodes progressent pour l'étude de l'interaction ion-matière et agrégats-matière. Elles nécessitent l'utilisation des ordinateurs les plus puissants. Les effets de perte d'énergie par excitation électronique sont bien connus dans les isolants et polymères : réarrangements atomiques, radiolyse ou changement de structure moléculaire... C'est dans le domaine des matériaux métalliques que des avancées remarquables ont été enregistrées par des équipes françaises travaillant au CIRIL avec des faisceaux d'ions lourds de forte énergie du GANIL : surefficacité de production de défauts, amorphisation, traces latentes. Le point commun à ces différents effets est qu'ils apparaissent au-dessus d'un seuil critique d'excitations électroniques. L'implantation ionique, bien que d'un usage encore limité en métallurgie, a vu son champ d'applications s'étendre à tous les matériaux. C'est un moyen unique pour obtenir des structures hors d'équilibre : amorphes, solutions solides sursaturées impossibles à produire autrement. Les recherches se sont développées en vue d'applications dans les domaines du frottement, de l'usure et de la corrosion (pièces de haute précision : aéronautique, spa-

tial, biomédical). De nouvelles variantes de l'implantation sont à l'étude : implantation basse énergie et diffusion ou implantation par plasmas pulsés. Le mixage ionique de multicouches (ou bicouches) est étudié pour réaliser des structures hors d'équilibre, et la physique du mélange intracascade est encore mal comprise et nécessite des approfondissements théoriques. Les dépôts assistés par bombardement ionique, les traitements de surface par plasmas réactifs et d'autres techniques hybrides sont l'objet de recherches très actives qui passent par l'étude des mécanismes de croissance de couches minces sous bombardement ionique. La faible épaisseur des couches implantées a nécessité la mise au point de méthodes d'étude spécifiques et l'apport de la microscopie électronique a été considérable, de même que la nano-indentation est en train de le devenir pour l'étude des propriétés mécaniques.

### **Matériaux nouveaux**

Les matériaux très durs pour des applications à très haute température et/ou dans des environnements agressifs (irradiation, corrosion...) représentent une catégorie importante. On cherche à les reproduire sous forme de revêtements adhérents. Le diamant et les matériaux dérivés : nitrure de bore cubique ou carbonitride présentent une ouverture scientifique pour les prochaines années. Le nitrure de bore cubique est plus difficile à synthétiser que le diamant, et l'élaboration de couches présentant un ordre à grande distance plus développé nécessite des progrès significatifs. Des calculs *ab initio* ont montré que des composés entre le carbone et l'azote pouvaient exister et avoir des propriétés physico-chimiques comparables à celles du diamant. Les résultats expérimentaux actuels sont parcellaires, sujets à controverse. Toutefois l'assistance ionique en cours de dépôt s'avère une voie intéressante.

La recherche de nouveaux matériaux est essentielle pour les différentes propriétés souhaitées. Nous venons de parler des propriétés mécaniques ; nous ne parlerons pas des propriétés électroniques, magnétiques et supraconductrices (qui émergent de la commission 6). Nous voudrions maintenant insister un peu plus sur les propriétés optiques. Les milieux amplificateurs laser sont

actuellement renouvelés par des matériaux solides (saphir au titane, fosterite, ...), et par des diodes laser. Les diodes étendent leur domaine vers le visible et le bleu grâce aux semi-conducteurs III-V et II-VI. Les fibres dopées aux terres rares sont utilisées en télécommunications (répéteurs). Les dispositifs électroluminescents à base de polymères conducteurs ont fait des progrès décisifs ces dernières années. L'optique non linéaire est également très demandeuse de nouveaux matériaux, que ce soit pour la génération de nouvelles longueurs d'onde par harmoniques (cristaux ioniques, organiques octupolaires), ou pour le stockage et le traitement du signal (cristaux ferro-électriques). Signalons les progrès considérables des polymères photoréfractifs. De nouveaux matériaux sont également nécessaires à l'optique intégrée et au stockage optique ou magnéto-optique.

## 6 - MÉTHODES, TECHNIQUES ET INSTRUMENTS

Certains outils modernes deviennent d'une utilisation tellement fréquente qu'ils peuvent influencer les axes de recherche. Il est donc nécessaire de les évoquer dans un rapport de conjoncture.

### L'outil informatique

L'outil informatique intervient maintenant pratiquement à tous les niveaux. Des simulations numériques de toutes sortes se développent actuellement de façon considérable en physique de la matière condensée. Il est cependant difficile d'inclure dans la même rubrique les spécialistes qui écrivent et optimisent des codes informatiques très lourds (comme les méthodes dites "*ab initio*" pour le calcul des structures électroniques), et des physiciens qui intègrent tout naturellement dans leurs activités une part de calcul numérique, qui peut aller d'une modélisation sur PC à l'aide d'un logiciel du commerce, à des programmes parfois conséquents. Toutes ces activités contribuent au dynamisme de la communauté.

On assiste actuellement à un développement spectaculaire et parallèle des simulations de "dynamique moléculaire" et "Monte-Carlo". Les simulations de dynamique moléculaire qui reproduisent l'évolution mécanique réelle d'un système concernent plutôt les aspects dynamiques (phonons, cinétiques rapides) et s'ouvrent de façon importante vers les systèmes hors d'équilibre et les effets transitoires. Avec les méthodes Monte-Carlo, qui introduisent des dynamiques fictives pour accélérer le retour à l'équilibre thermodynamique, on s'intéresse plutôt aux aspects statiques et aux relaxations lentes encore inaccessibles par la dynamique moléculaire. Ces méthodes s'appliquent à de nombreux systèmes de façon très réaliste : cristaux moléculaires, zéolithes, matériaux granulaires, verres, surfaces... Parmi les grandes avancées mondiales actuelles, il faut noter la montée en puissance des calculs *ab initio*, et notamment de la méthode de Car-Parrinello qui permet de combiner les calculs de structure électronique et la dynamique des ions sans faire d'hypothèse sur leur énergie potentielle. Ces méthodes ont été très longtemps absentes, ou pour le moins très discrètes, en France. Mais de nouvelles techniques de simulation apparaissent au-delà des méthodes Car-Parrinello standards : des méthodes d'optimisation permettent de simuler de plus gros systèmes pendant plus longtemps ; dans d'autres méthodes, on cherche à tenir compte d'états électroniques excités. Les matériaux étudiés par ces méthodes sont, entre autres, l'eau ou des cristaux moléculaires à transfert de charge. Beaucoup d'autres méthodes numériques sont utilisées en physique de la matière condensée. Par exemple, les méthodes d'éléments finis, familières dans d'autres domaines scientifiques (mécanique, hydrodynamique, thermodynamique), apparaissent à l'occasion de questions sur des systèmes qui peuvent être considérés comme continus, comme la répartition des contraintes dans des îlots déposés sur un substrat, les déformations macroscopiques de matériaux par recuit, etc. Mais aussi, une multiplicité de techniques "exotiques", liées à des problèmes spécifiques, se développe, montrant l'intégration croissante de la démarche numérique dans l'activité normale de la communauté. Une grande inventivité – sans doute insuffisamment reconnue – et une grande diversité défient le résumé.

Le calcul numérique n'est pas l'apanage des théoriciens. Des techniques d'ajustement des courbes de plus en plus sophistiquées sont utilisées par les expérimentateurs. De plus le traitement de données expérimentales lourdes devient grand consommateur de ressources informatiques, sur grands instruments notamment : structures hors normes, topographie de rayons X, matériaux désordonnés. Le développement de codes performants est une activité importante à ce titre. Quelques questions récurrentes restent sans réponses définitives à présent. Le parallélisme permet les fortes puissances de calcul indispensables dans de nombreux cas, mais l'effort de programmation est parfois important, car il faut repenser entièrement les algorithmes, et les résultats ne sont pas toujours à la mesure des efforts consentis. D'autre part l'équilibre entre gros centres de calcul, centres de calcul universitaires, et moyens au niveau des laboratoires, est l'objet de discussions difficiles tant ces éléments sont complémentaires les uns des autres. L'émergence de stations de travail de moins en moins coûteuses et de plus en plus puissantes est une donnée qui fait évoluer rapidement ce débat.

### Les techniques optiques

Les ondes optiques fournissent, sur la dynamique et la structure des matériaux avec lesquels elles interagissent, des renseignements spécifiques et souvent complémentaires des techniques classiques X et neutrons. Les méthodes employées incluent les spectroscopies fréquentielles ou temporelles, et une multitude d'effets optiques non linéaires qui commencent seulement à être exploités. Échos de photons, CARS, etc. se font maintenant avec une résolution de quelques dizaines de fs, et sont appliqués à la dynamique des porteurs dans des semi-conducteurs ou à la solvataion de molécules organiques. La spectroscopie résolue en fréquence, par creusement de trous spectraux ou isolation d'une seule molécule, permet une étude particulièrement fine des dynamiques intra- et intermoléculaires (tunneling, systèmes à deux niveaux). Les systèmes confinés tels qu'agrégats d'atomes ou de molécules, nanocristaux, silicium poreux, structures à puits quantiques... sont des sujets en développement rapide. De nouveaux effets non linéaires

et d'optique quantique commencent à être explorés en phase condensée et pourront déboucher sur de nouveaux dispositifs.

La microscopie optique confocale permet aujourd'hui la détection de molécules individuelles sur des surfaces ou dans des solutions. Avec la méthode de corrélation de fluorescence, qui donne accès à la dynamique nanoscopique, elles ouvrent de vastes perspectives en biologie. Un autre domaine en pleine effervescence est la microscopie optique en champ proche, où une fibre étirée vient sonder localement l'échantillon. Le couplage de cette technique à l'optique non linéaire et à la spectroscopie permettrait de nombreuses études physico-chimiques et biologiques.

### Les très grands instruments

Les super-outils modernes que sont les très grands instruments sont des laboratoires interdisciplinaires, des ressources nationales pour une très grande variété de chercheurs et de disciplines. Pour certaines lignes de recherche relevant de notre secteur scientifique, le rayonnement synchrotron, les sources de neutrons, les champs intenses, les ions lourds sont des pièces maîtresses de l'activité en recherche fondamentale ou du développement de nouvelles technologies, pour d'autres la base d'outils variés.

Les sources de neutrons et le rayonnement synchrotron sont des legs de la physique des hautes énergies dont tirent parti toutes les disciplines scientifiques. Les physiciens de la matière condensée ont joué un rôle moteur pour construire, autour de ces sources de particules, de nouveaux outils centrés sur la diffusion-diffraction des neutrons (élastique ou inélastique, nucléaire ou magnétique), les spectroscopies de niveaux de cœur UV-X (0,010-50 KeV), la diffusion-diffraction X (élastique ou inélastique, résonnante ou non-résonnante), et l'imagerie vers la biologie, la géochimie, les sciences de l'environnement, la science des matériaux, les technologies extrêmes, ...

## Photons

Les sources de photons d'énergie continûment ajustable, de polarisation accordable, avec des hauts flux exceptionnellement collimatés, cohérents dans un volume appréciable, ont pris une place très importante dans des disciplines majeures des politiques de recherches nationale et européenne :

- la biologie structurale et la dynamique de sites,

- la physique des surfaces, la structure de la submonocouche, ses propriétés électroniques et magnétiques,

- le magnétisme local avec sélectivité chimique et séparation des contributions des moments de spins et orbitaux pour chaque symétrie orbitalaire,

- les transitions de phases des matériaux, y compris ceux du globe terrestre et la nouvelle chimie de la matière très condensée, éventuellement avec en plus de la haute pression la très basse ou très haute température,

- l'ordre à moyenne distance dans la matière molle, polymères, colloïdes surfaces,

- l'imagerie dont les contrastes s'appuient sur la diffraction révélant les champs de déformations autour des défauts, sur le dichroïsme magnétique circulaire, sur la cohérence génératrice de contrastes de phase, sur l'absorption différentielle.

Cette constatation sur l'impact des sources brillantes, blanches, polarisées, pulsées, que sont les sources de rayonnement synchrotron s'étend aux Sciences de l'Univers (géophysique sous conditions extrêmes ( $p=1\text{Mbar}$  et  $T=3000\text{K}$  simultanément) et aux Sciences de l'Environnement tout juste émergentes, où la complexité des matériaux trouve avec le rayonnement synchrotron des outils sans équivalent pour les études spectroscopiques et structurales. La physico-chimie des surfaces et interfaces, qui sous-tend la compréhension des phénomènes de l'adhésion, de la tribologie, de la réactivité des molécules avec les surfaces, est aussi à citer puisque les spectroscopies faites avec le rayonnement synchrotron jouent un rôle essentiel dans le

développement nouveau de ces disciplines. L'étude de la réactivité des atomes et molécules, neutres, ionisés ou multionisés, est fondamentalement importante puisqu'elle est en amont de nombreux axes scientifiques et technologiques (citons l'insolation en couche profonde des polymères nécessaires à la lithographie du procédé LIGA pour la microfabrication). C'est un des thèmes où les équipes françaises sont en pointe.

Ces disciplines se développent avec la perspective de la création d'un nouveau laboratoire national de rayonnement synchrotron, SOLEIL, qui doit se substituer en son temps (2001-2003) à l'actuel LURE. Complémentaire de l'ESRF, source de rayons X plus durs, SOLEIL est schématiquement le "microscope" pour regarder la structure électronique, y compris avec résolution en spin, tandis que ESRF est le "microscope" pour voir l'organisation des atomes.

## Neutrons

Les sources de neutrons jouent un rôle fondamental, irremplaçable pour analyser les structures de la matière molle ou celles des systèmes dépourvus d'éléments lourds. Par la diffraction de neutrons, on peut, grâce à la deutération, déterminer la place de l'oxygène, de l'azote, de l'hydrogène et, avec la contribution de la RMN, celle du proton et du carbone. La communauté française est bien placée dans l'ensemble international disposant du LLB, source très performante, qui s'est avérée précieuse pendant l'arrêt de l'ILL, de nouveau opérationnel. Au cœur de la physico-chimie de la matière molle, les molécules amphiphiles jouent un rôle de premier plan, non seulement dans la stabilisation des émulsions, mais aussi dans la formation de structures plus complexes comme les phases cubiques, colonnaires, lamellaires ou les membranes biologiques. La stabilité des couches monomoléculaires d'interface, leur rigidité, leur courbure spontanée, dépendent non seulement de leur structure chimique (chaînes aliphatiques et têtes polaires), mais aussi de leur organisation bidimensionnelle. C'est également un problème important pour comprendre les propriétés des multicouches de type Langmuir-Blodgett que l'on retrouve dans des technologies émergentes de l'optoélectronique. Les

techniques de réflectivité des RX et de diffraction de surface en incidente rasante ou encore des neutrons froids donnent accès aux profils de densité et à la rugosité des couches de surface, avec le souci de modéliser l'organisation en épaisseur de la monocouche. L'étude des micelles et colloïdes, où l'ordre à moyenne distance est le paramètre structural pertinent, est inconcevable sans l'apport de la diffusion des neutrons.

Le deuxième domaine privilégié des neutrons concerne la dynamique des systèmes. Évaluer la dispersion des ondes de spins et les branches de phonons des matériaux cristallisés est toujours une activité centrale des programmes sur les matériaux magnétiques supraconducteurs. Notons une fois de plus la préoccupation des physiciens, particulièrement ceux de notre secteur pour s'ouvrir à de nouvelles méthodes et à de nouveaux concepts de la physique pour aborder des thématiques proches des sciences de la vie. Cette démarche devient très fructueuse dès lors que le dialogue s'établit avec des biologistes dont les compétences en biochimie et biophysique sont maintenant telles qu'un langage commun existe.

Le troisième axe de recherches où les neutrons sont irremplaçables est évidemment le magnétisme. À côté des méthodes confirmées de la diffraction magnétique des neutrons polarisés, pour déterminer la structure magnétique, et de la diffusion inélastique pour la mesure des excitations magnétiques, émergent des voies nouvelles : la réflectivité des neutrons polarisés pour les films très minces ferromagnétiques et l'analyse à trois dimensions de la polarisation combinée à une meilleure maîtrise des neutrons polarisés que procure le filtre à  $^3\text{He}$  polarisé. La description complète du système

se ferait alors au travers de seize fonctions de corrélation impliquant les grandeurs magnétiques donnant une information surdimensionnée dans le cas d'un site unique. Une présentation plus détaillée de ces nouvelles directions de recherches relèvent de la section 6 du secteur SPM.

## CONCLUSION

Si l'utilisation des méthodes numériques et des grands instruments se développe actuellement de plus en plus, il ne faut pas oublier les techniques traditionnelles de la physique de la matière condensée : vide, basses températures, hautes températures, hautes pressions, champs intenses, etc., qui leur sont complémentaires et qui nécessitent toujours une compétence technologique de haut niveau.

Dans un rapport de conjoncture scientifique, on ne saurait oublier l'importance du potentiel humain indispensable pour mener à bien les recherches. Les progrès réalisés dans nos laboratoires sont liés à la complémentarité entre les chercheurs et les personnels ingénieurs, techniciens et administratifs. Il se trouve que dans quelques années, notamment en France, un trop grand nombre de ces personnels vont partir à la retraite avec leurs compétences et leur savoir-faire. Pour qu'une recherche de haut niveau puisse être maintenue, il faut absolument préserver et transmettre ces compétences par une politique d'embauche et de formation permanente adaptée à cette situation.