

06

MATIÈRE CONDENSÉE : STRUCTURES ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES

MICHEL PIECUCH

Président de la section

DOMINIQUE CHANDESRI

Rapporteur

Philippe Arcade

Michel Averous

Michel Barrault

Etienne Bustarret

Maria Chamarro

Mireille Cuniot

Jean-Michel Desvignes

Michel Devoret

Jean-Pierre Faurie

Jacques Ferré

François Gendron

Dominique Givord

Henri Godfrin

Jean Leotin

Philippe Monod

Rémy Mosseri

Roger Pierrisnard

Véronique Pierron-Bohnes

Robert Romestain

L'activité scientifique des chercheurs et des laboratoires dépendant de la section 06 est très diversifiée et couvre *a priori* presque tous les domaines de la physique de l'état condensé. Toutefois, il est possible d'extraire quelques thèmes qui fédèrent l'activité de la majorité des chercheurs de la section, tout en étant conscient de ne pas rendre compte ainsi de toute la diversité de nos centres d'intérêt. De plus, les frontières entre les thématiques principales des différentes sections sont souvent floues. C'est avec la section 05 (Matière condensée : organisation et dynamique) que les recouvrements sont les plus importants, mais on remarque aussi des thèmes communs à la section 04 (matériaux pour l'optique par exemple), la section 08 (dispositifs semi-conducteurs), la section 15 (polymères) et plusieurs sections de chimie (pour tout ce qui concerne la science des matériaux).

Le découpage thématique adopté ici est proche de celui retenu pour les réunions thématiques organisées par la section en 1994-1995 : semi-conducteurs, magnétisme, supraconducteurs et fluides quantiques, états particuliers de la matière.

Dans le domaine des **semi-conducteurs**, on note l'émergence de nouveaux matériaux à large bande interdite, cruciaux pour les applications dans l'optoélectronique, la micro-électronique en milieu hostile ou pour l'électronique de puissance. Les

structures quantiques sont un sous-domaine en très forte expansion où les recherches font progresser la technologie : on pense bien sûr aux propriétés optiques, magnétiques ou de transport des puits, fils et boîtes quantiques indépendants ou couplés. L'attention se porte également sur le rôle (et le contrôle à l'échelle atomique) des surfaces et interfaces. Des effets électroniques, optiques et mécaniques supplémentaires sont attendus et observés lorsque les structures réalisées à l'échelle submicronique sont intégrées à grande échelle, comme c'est le cas pour les applications industrielles des semi-conducteurs aux micro-capteurs ainsi qu'aux composants électroniques ou opto-électroniques.

Les études en **magnétisme** reposent sur une grande diversité de nouveaux systèmes qui peuvent se présenter sous des formes variées : polycristaux, monocristaux, grains fins, couches minces, multicouches, agrégats, ... Ils font l'objet d'études fondamentales dont l'analyse peut permettre la mise en évidence de nouveaux effets physiques (ordres de type liquides de spin, magnétorésistance géante, renversement d'agrégats par effet tunnel), mais constituent aussi des matériaux aux propriétés spécifiques qui peuvent trouver leur place dans des applications (matériaux pour l'enregistrement, nanostructures au comportement magnétique ultra-doux ou dur).

La mise à profit des progrès des techniques de fabrication et des moyens de caractérisation est cruciale. L'étape de l'élaboration nécessite d'associer des compétences variées, de chimiste, métallurgiste ou physicien. C'est le terme d'ingénierie des matériaux qui s'impose lorsqu'il s'agit d'obtenir des clusters de quelques atomes magnétiques dans une matrice organique ou de maîtriser la croissance de multicouches plan à plan. Du point de vue des techniques expérimentales, les avancées principales ont résulté des possibilités offertes par les TGE et les techniques de champ proche. Le calcul et la simulation numériques ont permis de grands progrès dans la précision des calculs de bande et la compréhension des processus d'aimantation.

Nous sommes actuellement à un tournant important dans l'histoire de nos connaissances fondamentales et des applications de la **supraconductivité**. Peut-être plus que d'autres domaines de

la matière condensée, la supraconductivité a subi déjà de réelles révolutions au cours de son histoire, très brève par rapport à la science des matériaux plus classiques. Le dernier tournant a été amorcé en 1987 par la découverte d'oxydes de cuivre mixtes dont la température de transition, en dépassant 100 K, permet de s'affranchir des servitudes liées à l'utilisation de l'hélium liquide. Le second aspect de cette découverte a pris au cours du temps une importance croissante : c'est celui de la découverte de notre ignorance dans la compréhension fondamentale des mécanismes et des interactions électroniques dans ces composés d'oxydes mixtes.

La problématique actuelle se joue donc sur un terrain double. Il faut développer notre connaissance des matériaux de base (et ceux dérivés de cette recherche) et améliorer leur capacité en courant critique. D'autre part, la découverte des phases conductrices des cuprates mixtes a servi de révélateur à l'importance du problème sous-jacent des propriétés des électrons "fortement corrélés". Ce sont ces deux enjeux "**matériaux supraconducteurs**" et "**électrons fortement corrélés**" que le présent rapport de conjoncture souhaite mettre en lumière.

Le thème des **solides et liquides quantiques** concerne les propriétés fondamentales et les applications de l'hélium et de l'hydrogène. Condensé sous forme solide ou liquide, l'hélium fournit une grande variété de systèmes-modèles expérimentaux pour l'étude des Fermions (^3He) et des Bosons (^4He) en interaction. Les recherches dans ce domaine sont par conséquent étroitement associées aux progrès de la théorie de la matière condensée.

L' ^3He superfluide, dont la découverte vient d'être récompensée par le prix Nobel, est un magnifique exemple de "supraconducteur non-conventionnel". On s'intéresse à présent aux propriétés des super-courants de spin et des défauts topologiques dans ce système, et à leur application dans le contexte des transitions de phase en cosmologie. Ces études impliquent la maîtrise d'une technologie "très basses températures" de pointe.

Le dernier thème, **états particuliers de la matière**, se propose de faire le point sur des types de matériaux caractérisés par l'absence de répéti-

tion périodique de l'arrangement atomique, **quasi-cristaux, verres et agrégats**. Le physicien du solide est alors confronté à l'impossibilité d'utiliser le cadre conceptuel qui a fondé sa discipline, théorème de Bloch, zones de Brillouin, etc.

Dans cette perspective, une approche féconde de ces quinze dernières années a été l'émergence du concept de *frustration géométrique*, qui s'attache à décrire les situations de conflit entre un arrangement atomique local préférentiel et l'impossibilité pour celui-ci de se propager librement dans tout l'espace. Si ce concept a trouvé de nouveaux champs d'application du côté de la matière molle, la question de l'ordre icosaédrique dans les solides compacts appartenant aux trois types ci-dessus y fait office de paradigme.

Au-delà de ces ressemblances, chacun de ces états de la matière est l'objet de recherches qui tendent à mettre l'accent sur les *propriétés spécifiques* associées à un système donné. Ainsi insistera-t-on avec force sur le rôle de la quasipériodicité dans les quasicristaux, sur le caractère universel d'une "transition vitreuse" et de propriétés particulières à basse température dans les verres, ou bien encore sur la rupture de l'ordre à la surface, ou enfin sur les effets de taille dans le domaine des agrégats.

Les physiciens du solide sont des utilisateurs assidus des grands équipements : sources de rayonnement synchrotron, de neutrons, d'ions lourds et champs magnétiques intenses. Les techniques expérimentales qui y sont développées permettent une caractérisation structurale, électronique et magnétique de la matière tout à fait complémentaire de celle obtenue par les techniques réalisées en laboratoire. Ces grands instruments concernent une communauté très vaste et pluridisciplinaire et constituent des lieux d'échanges permanents et spontanés. Enfin, dans tous les domaines qu'aborde notre communauté, les théoriciens doivent pouvoir bénéficier de moyens de calcul adaptés à leurs besoins actuels.

Cette analyse de la conjoncture a permis de mettre en lumière de nombreuses évolutions communes aux différents thèmes : l'intérêt croissant vers les systèmes de dimensionnalité réduite et les nano-objets, le rapprochement entre les chimistes

et les physiciens du solide pour définir les méthodes d'élaboration de nouveaux composés, la place de plus en plus importante prise par l'instrumentation. On note aussi une forte imbrication entre les différentes thématiques et la large diffusion des méthodes expérimentales et théoriques d'un domaine à l'autre. Enfin, comme cela avait été souligné lors des journées thématiques, les applications des nouveaux dispositifs suivent de très près – ou accompagnent – les progrès dans la compréhension des matériaux et orientent de plus en plus les évolutions des études.

1 - PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS

1. 1 GÉNÉRALITÉS

La perfection cristalline et le contrôle des impuretés qu'imposaient les applications des semi-conducteurs ont propulsé, il y a quelques décennies, certains matériaux massifs ainsi que leurs surfaces au rang de prototype pour l'étude de nombreuses propriétés des solides cristallins. De même, la maîtrise quasi-parfaite de certains semi-conducteurs a fourni la base technologique permettant la réalisation de systèmes modèles artificiels pour cette physique des microstructures dont le développement est si spectaculaire depuis 1980.

Les questions liées aux hétérostructures nanométriques périodiques ou non et aux structures quantiques ont d'ailleurs constitué plus de la moitié du menu proposé lors des dernières éditions de la conférence internationale sur la physique des semi-conducteurs, alors que les propriétés (y compris magnétiques) des matériaux massifs et celles des défauts et impuretés ne rassemblaient plus qu'un tiers des contributions et que le sixième restant était essentiellement constitué de matériaux plus ou moins nouveaux souvent étudiés à la marge dans un esprit interdisciplinaire (fullerènes, Si poreux, Si amorphe, etc.). Il ne faudrait par

ailleurs pas oublier certains domaines contigus comme par exemple l'(opto)électronique moléculaire mettant notamment en œuvre des polymères semi-conducteurs.

Lors de la réunion thématique de prospective organisée par la commission 06 en juin 1994, on a pu constater une tendance lourde de la communauté mondiale vers ce que d'aucuns ont baptisé la physique de l'effet : "Il ne s'agit pas tant de percer les mystères de la nature que de la dominer (et d'abord la technologie) et de jouer avec, pour obtenir de nouveaux effets" (cf. le compte-rendu de cette réunion). C'est alors l'originalité de l'effet (statique ou dynamique, linéaire ou non, etc.) et la qualité de la technologie qui sont les clefs d'un succès marquant : l'ingénierie de structure de bandes a par exemple permis la réalisation de miroirs de Bragg à électrons dans un laser intrabande à cascade.

On pense bien sûr aux propriétés optiques, magnétiques ou de transport des puits, fils et boîtes quantiques indépendants ou couplés, qui impliquent de façonner à l'échelle du nanomètre les matériaux dans une et de plus en plus souvent deux ou trois dimensions de l'espace. D'autres effets spectaculaires peuvent également être obtenus lorsque les structures sont réalisées à l'échelle sub-micrométrique qui est celle de l'intégration des composants électroniques industriels (avec des phénomènes mécaniques ou électriques mal compris), mais aussi celle de la longueur d'onde lumineuse qui concerne les microcavités optiques ou les matériaux à bande interdite photonique.

Qu'on le veuille ou non, force est de reconnaître dans cette approche certaines caractéristiques du génie des matériaux (auquel on l'oppose trop souvent) avec la nécessité d'une approche interdisciplinaire (pour optimiser le couple effet physique/assemblage de matériaux) et les habituels verrous que constituent les étapes de croissance (par exemple en épitaxie forcée) et le micro(nano)-usinage (lithographies, gravures). La démarche n'est finalement pas si différente de celle qui sous-tend nombre d'applications, et on pourrait espérer des retombées industrielles (notamment dans le domaine des capteurs) pour peu que les partenaires économiques jouent le jeu de la prise de risque en commun (et de l'embauche de jeunes scientifiques),

d'autant que la conjoncture économique mondiale de l'industrie des semi-conducteurs est favorable, y compris sur le plan français.

1. 2 TENDANCES PRINCIPALES

On remarque l'émergence de nouveaux matériaux à large bande interdite en couches minces, cruciaux pour les applications dans l'optoélectronique (certains II-VI comme le ZnSe, les SiC malgré un gap indirect, les nitrures III-V comme GaN, InN, AlN), pour la micro-électronique en milieu hostile ou pour l'électronique de puissance (nitrures III-V, SiC, diamant malgré la difficulté du dopage n). Cela relance l'intérêt pour les monocristaux massifs (notamment comme substrats pour l'épitaxie), leurs surfaces et leurs défauts, ainsi que pour les dernières possibilités restées inexploitées (effets du Be). Rappelons qu'outre les problèmes de croissance et d'interface, ceux que posent le dopage, la passivation par l'hydrogène et la diffusion des défauts sont non triviaux dans ces matériaux à large bande interdite. De plus, certains régimes de transport ou de recombinaison non-radiative demeurent mal compris. L'optimisation des techniques de croissance épitaxiée et la maîtrise du dopage ont permis la production commerciale de DEL au SiC (bleu), au GaInN (de l'orange au violet) ou au ZnSe (vert) ainsi que l'obtention très récente de diodes laser verte (au ZnSe) et violette (au GaN). C'est un domaine où les applications accompagnent de très près – ou même précèdent – les progrès dans la compréhension du matériau et où, du point de vue de l'innovation, l'opposition entre matériaux massifs et hétérostructures semble dépassée.

En ce qui concerne les hétérostructures et les super-réseaux, on note l'intérêt croissant porté aux propriétés de transport (effet Hall quantique fractionnaire) et aux cristaux de Wigner avec des avancées théoriques indéniables (anyons). Côté matériaux, on peut rappeler que beaucoup d'interfaces sont désormais étudiées au sein d'hétérostructures, et remarquer une percée relative des hétérostructures SiGe (détecteurs IR par transitions intrabande) qui accompagne les progrès réalisés sur les alliages SiGe (dispositifs hyperfréquence : TBH à fréquence de coupure dépassant la centaine de GHz) aux-

quels on envisage d'adjoindre du carbone. Ces succès ont provoqué une diminution assez nette de l'effort consacré jusque-là aux siliciures semi-conducteurs. Enfin, la photoluminescence du Si poreux a donné lieu à une mobilisation interdisciplinaire soutenue qui a, entre autres, contribué à relancer le silicium pour les nanostructures et les nanocomposites auto-organisés, et fait revisiter le problème du confinement quantique dans les semi-conducteurs désordonnés.

Les structures quantiques sont un sous-domaine en très forte expansion où les recherches font progresser la technologie : par exemple, les fils quantiques réellement nanométriques deviennent enfin reproductibles notamment grâce à la conjugaison de techniques 2D. Le domaine des nanocristaux est également en pleine ébullition, avec entre autres l'observation de la luminescence d'une seule boîte quantique, la réalisation de réseaux 2D et 3D d'agrégats, l'épitaxie en phase liquide de matériaux de bande interdite plus large sur des nanocristaux de CdS. L'attention se porte actuellement sur le rôle (et le contrôle !) de l'interface avec la matrice environnante.

Au risque d'empiéter sur le domaine de compétence de la section 08, signalons enfin le domaine des applications photovoltaïques, moins soutenu en France que dans la plupart des autres pays industrialisés, qui s'appuie sur la physique de matériaux semi-conducteurs le plus souvent en couches minces, tels que les silicium amorphe, microcristallin et polycristallisé, ou que les composés I-III-VI₂ comme CuInSe₂.

1. 3 INSTRUMENTATION

Du point de vue instrumentation, on se contentera de remarquer à quel point les technologies (litho, gravure, micro-usinage) de définition de motifs micro- puis nanométriques développées pour la microélectronique ont diffusé et diffusent encore vers l'ensemble de la physique des solides pour ce qui est des mesures, et vers la physique des nanostructures pour ce qui est des effets mésoscopiques. Les autres dominantes sont, comme pour beaucoup d'autres thèmes (magnétisme, supracon-

ducteurs), l'apport croissant des techniques de champ proche (des microscopies de champ proche spécifiques sont développées pour les surfaces semi-conductrices). L'importance stratégique des moyens mi-lourds de croissance ou de mise en forme est attestée par le mode de fonctionnement en réseaux de collaboration de la plus grande partie des physiciens des semi-conducteurs. On notera également l'avantage que procure à certains laboratoires leurs liens privilégiés avec un équipementier du secteur.

1. 4 INTERDISCIPLINARITÉ

Pour ce qui est des contacts avec d'autres disciplines, seule celle avec les opticiens est traditionnelle : les lasers à semi-conducteurs constituent désormais un thème en soi, avec l'optimisation par confinement séparé et par contrainte, et plus récemment des cavités verticales à miroir de Bragg qui permettent d'obtenir des lasers à seuil nul. On citera également la mise en évidence de fonctions logiques ultra-rapides "tout-optique" ou encore les domaines des semi-conducteurs photo-réfractifs et de l'optique non-linéaire dans les polymères.

Les recoupements avec le magnétisme sont de plus en plus nombreux, qu'il s'agisse de transistors de spin, de matériaux semi-magnétiques ou d'hétérostructures où les ions magnétiques sont dans les puits. L'interdisciplinarité est inhérente aux études qui se font jour sur l'interface matériau semi-conducteur/matériau magnétique (ou supraconducteur). Elle est une condition nécessaire du succès pour les applications aux capteurs miniaturisés et aux micro-systèmes, ou même parfois pour la mise au point d'outils mi-lourds : les physiciens des plasmas sont par exemple sollicités pour l'étude des plasmas froids utilisés pour la gravure sèche de semi-conducteurs... On peut cependant regretter que certaines possibilités restent largement sous-exploitées (physique statistique, électronique moléculaire).

2 - MAGNÉTISME

Les études en magnétisme reposent sur une grande diversité de nouveaux systèmes : alliages ou composés métalliques, composés interstitiels, quasi-cristaux, alliages ou composés demi-métalliques, systèmes uni- ou bi-dimensionnels, matériaux moléculaires. Ces systèmes peuvent se présenter sous des formes variées : polycristaux, monocristaux, grains fins, couches minces, agrégats, ... Ils sont les objets d'études fondamentales dont l'analyse peut requérir le développement de nouveaux concepts, ils constituent des matériaux aux propriétés spécifiques qui peuvent trouver leur place dans des applications.

L'analyse permet de mieux en mieux de comprendre les comportements de systèmes complexes, tels que ceux où les interactions sont fortement frustrées. Un domaine fécond a été celui des couches minces et multicouches. Le mécanisme de couplage à travers une couche non-magnétique et le phénomène de magnétorésistance géante ont été interprétés. Dans le domaine des matériaux magnétiques, les comportements ultra-doux ou durs découverts trouvent directement leur origine dans les spécificités de la nanostructure.

La mise à profit des progrès des techniques de fabrication et des moyens de caractérisation est cruciale. L'étape de l'élaboration nécessite d'associer des compétences variées, de chimiste, métallurgiste ou physicien. C'est le terme d'ingénierie des matériaux qui s'impose lorsqu'il s'agit d'obtenir des clusters de quelques atomes magnétiques dans une matrice organique ou de maîtriser la croissance de multicouches plan à plan.

Du point de vue des techniques expérimentales, les avancées principales ont résulté des possibilités offertes par les TGE et les techniques de champ proche. Le calcul et la simulation numériques ont permis de grands progrès dans la précision des calculs de bande et la compréhension des processus d'aimantation.

2. 1 NOUVEAUX SYSTÈMES MAGNÉTIQUES, NOUVELLES APPROCHES

Intermétalliques

La compréhension du magnétisme à l'échelle atomique a progressé à travers l'étude de nouveaux systèmes : instabilités magnétiques dans des composés à base de terres rares, ferrimagnétisme dans des alliages contenant des éléments dont aucun n'est magnétique, nouveaux composés dans lesquels magnétisme et supraconductivité coexistent.

Frustration dans les systèmes magnétiques

La frustration en magnétisme est en général associée au désordre. Dans les composés sans désordre, elle peut conduire à des propriétés originales (structures magnétiques incommensurables). Les liquides de spin constituent une nouvelle catégorie de matériaux (oxydes, métaux ou composés moléculaires) où les interactions magnétiques sont frustrées. La nature de l'état liquide de spin pourrait être réminiscent de celui d'un vrai liquide ou s'approcher d'un ordre chiral ou nématique.

Systèmes d'électrons fortement corrélés

Des questions spécifiques concernent ce domaine : - les transitions isolant-métal dans les oxydes des métaux de transition sont-elles liées à l'apparition d'un gap entre bandes de Hubbard ou à la disparition d'un pic étroit de quasi-particules près du niveau de Fermi ? - À proximité d'une instabilité magnétique-non magnétique les comportements "non-liquides de Fermi" observés sont-ils liés à l'existence d'une transition de phase à 0 K ?

Magnétisme moléculaire

Au-delà de l'étude du magnétisme de la molécule, on s'intéresse à la création de nouveaux objets magnétiques : systèmes bistables à transition de spin, molécules à haut spin, aimants à précurseurs moléculaires, aimants purement organiques, édifices magnétiques supramoléculaires. Les progrès

reposent sur des interactions fortes entre physiciens et chimistes inorganiciens.

Magnétisme des oxydes

Un grand regain d'intérêt, stimulé par la découverte des supraconducteurs à haut T_c , existe pour les oxydes magnétiques. Deux thèmes se sont développés récemment :

- *la transition de spin-Peierls de CuGeO_3 . Une chaîne antiferromagnétique de spin 1/2 peut, en se dimérisant, donner naissance à un état fondamental singulet séparé d'un continuum d'états excités. C'est la transition de spin-Peierls. La découverte d'une telle transition dans CuGeO_3 a ouvert un vaste champ d'expériences sur un composé qui apparaît comme un modèle de système de fermions fortement corrélés.*

- *Composés pérovskites de type (La-R) MnO_3 . La redécouverte d'une magnétorésistance gigantesque a donné une nouvelle actualité à l'étude de ces composés qui sont à la frontière entre un état ferromagnétique conducteur et un état antiferromagnétique isolant. Les propriétés de transport sont déterminées par la compétition entre double échange et ordre de charge, cette compétition étant contrôlée par la taille de l'ion (des ions) au site de La. Les corrélations électroniques importantes sont certainement à l'origine de la localisation des charges.*

2. 2 SYSTÈMES DE DIMENSION RÉDUITE

Films minces et multicouches

Les progrès les plus significatifs concernent les effets quantiques de taille dus au confinement des électrons dans les couches. Ces effets peuvent être observés par photoémission. Leur conséquence la plus spectaculaire est le comportement oscillant du couplage entre couches magnétiques séparées par un métal non-magnétique. Les effets quantiques donnent également lieu à des propriétés magnéto-optiques particulières.

Des études expérimentales de l'anisotropie

d'interface ont révélé le rôle joué par l'hybridation entre couches. L'interprétation microscopique a bénéficié de l'avènement du dichroïsme magnétique des rayons X et, du point de vue théorique, des progrès des techniques de calcul *ab initio* de la structure électronique.

Les thèmes nouveaux concernent l'analyse de phénomènes variés dans des hétérostructures du type ferromagnétiques/semi-conducteurs ou isolants.

Nanostructures magnétiques

C'est un domaine pluridisciplinaire dans lequel les laboratoires français, organisés autour du GDR "nanostructures magnétiques", sont très actifs.

- Les mésostructures fabriquées par lithographie permettent le contrôle de la géométrie et de l'organisation des particules à une échelle de l'ordre du micron. Ce domaine, déterminant pour les applications, débute à peine.

- Les nanoparticules regroupent les systèmes formés de quelques dizaines d'atomes (agrégats, grosses molécules magnétiques) jusqu'aux systèmes précipités sol-gel. Le contrôle quasi parfait de la structure a permis des études spectaculaires : effet tunnel quantique macroscopique, ferromagnétisme à l'échelle de quelques atomes. La dynamique du renversement d'aimantation de tels objets est une propriété peu connue et cruciale pour les applications à haute fréquence.

Des technologies nouvelles se développent pour combler le gap existant entre mésostructures et nanoparticules. Les techniques sous pointe (lithographie sous STM, nanoindentation, croissance sous pointe, déplacement d'atomes) ont un potentiel considérable pour la nanofabrication et l'étude des propriétés fondamentales. On peut citer aussi la croissance électrochimique à travers des pores, l'utilisation de traces d'ions pour créer des nanofils ou le dépôt de nanostructures par jet d'atomes focalisé.

L'étude des effets quantiques dans les mésostructures de couches minces magnétiques est un thème de grand intérêt, relié à l'étude de l'injection de spin. Les longueurs électroniques fondamentales

dans les métaux sont un ordre de grandeur plus faible que dans les semi-conducteurs, ce qui pose un difficile problème technique. Des recherches sur les systèmes hybrides, associant semi-conducteurs ou supraconducteurs aux matériaux magnétiques, devraient aussi se développer.

2. 3 MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES AUX PROPRIÉTÉS SPÉCIFIQUES

Matériaux magnétiques doux

On sait maintenant élaborer, pour l'électro-technique de puissance, des tôles Fe-Si sous forme de rubans. Un effort porte par ailleurs sur l'obtention de tôles texturées ayant deux directions de facile aimantation dans le plan de la tôle. Les applications potentielles concernent les situations où l'orientation du champ varie dans le plan de la tôle (machines tournantes).

Pour l'électronique aux fréquences moyennes et élevées, les alliages nanocristallisés concurrencent les ferrites et les amorphes. Des progrès sont nécessaires dans plusieurs directions : compréhension des processus d'aimantation, influence des contraintes et description des effets magnétoélastiques dans un milieu hétérogène, analyse des phénomènes de vieillissement magnétique ; amélioration des propriétés mécaniques ; recherche d'alliages à fortes inductions (1,7 Tesla dans les alliages FeCoZr, FeZrB).

Du point de vue de l'utilisation des matériaux doux, un effort doit être fait pour décrire le comportement anisotrope et l'hystérésis. Des progrès dans la simulation sont aussi nécessaires pour décrire le caractère polycristallin ou nanocristallin des matériaux.

Matériaux magnétiques durs

A la suite de la découverte des aimants Nd-Fe-B, la mise en place à l'échelle européenne d'une structure de concertation scientifique a été extrêmement fructueuse. Les composés interstitiels du

type $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_{3-d}$ constituent une nouvelle famille de matériaux durs. Ils ouvrent la voie à toute une nouvelle catégorie de matériaux magnétiques.

Un problème de grande importance est la fabrication de poudres anisotropes coercitives. La technique dite HDDR (Hydruration, Décrépitation, Désorption, Recombinaison) a été développée au Japon ; sa maîtrise pose de grandes difficultés techniques.

Des propriétés originales apparaissent dans des alliages nanostructurés (renforcement de rémanence, comportement de type spring-magnet dans des alliages associant une phase dure et une phase douce à forte aimantation) ; elles résultent du couplage d'échange entre cristallites dont les dimensions sont de l'ordre de l'épaisseur de parois.

Matériaux magnétostrictifs

Dans les alliages magnétostrictifs du type Metglas, la magnétostrictivité est très forte (rapport entre valeur de la magnétostriction et champ nécessaire à sa manifestation). Dans les composés du type Terfenol, c'est la valeur absolue de la magnétostriction qui est le paramètre principal. Des couches minces d'alliages amorphes R-Fe ou R-Co à forte magnétostriction ont été récemment obtenues.

Matériaux pour l'enregistrement

- *Enregistrement magnéto-optiques.* Dans les composés à base d'alliages amorphes, tels TbFeCo, la tendance est d'associer plusieurs couches ayant des propriétés magnétiques différentes pour satisfaire aux techniques de sur-écriture ou de super-résolution magnétique. La capacité d'enregistrement obtenue est de 5 Goctets par face pour un disque de 120 mm de diamètre. Les recherches s'orientent vers l'optimisation des matériaux pour leur utilisation à faibles longueurs d'onde (vert ou bleu) en vue d'augmenter la densité d'enregistrement.

- *Enregistrement magnétique.* Pour les disques durs, les recherches visent à augmenter le champ coercitif et diminuer le bruit des médias, en vue d'augmenter la densité d'enregistrement tout en gardant un bon rapport signal/bruit. Pour les bandes, on s'oriente vers l'utilisation des matériaux

particulaires et des métaux évaporés. De nouveaux médias d'enregistrement pourraient apparaître, formés d'un réseau de plots sub-microniques de très haute densité, mais des problèmes fondamentaux ne sont pas résolus.

- *Matériaux pour têtes d'enregistrement.* Ce sont en général des matériaux doux de forte perméabilité. La lecture par magnétorésistance permet de détecter des domaines plus petits. Les matériaux les plus étudiés utilisent l'effet de magnétorésistance géante. Ce phénomène fait l'objet de recherches fondamentales importantes.

Ferrofluides

Les ferrofluides sont des suspensions colloïdales de nanoparticules magnétiques. C'est un outil potentiel puissant d'étude des propriétés de nanomagnétisme. La conjonction inhabituelle des propriétés liquides et magnétiques conduit à des propriétés physiques nouvelles et des applications originales. Les thèmes de recherche les plus actifs portent sur la réalisation de microstructures magnétiques et celle de matériaux magnétiques complexes associant les propriétés du ferrofluide et celle du milieu "hôte".

2. 4 NOUVELLES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Microscopies magnétiques en champ proche

Les techniques de champ proche ouvrent de grandes perspectives pour une meilleure connaissance des structures magnétiques de taille nanométrique. La microscopie de force magnétique (MFM) permet d'avoir une image des structures en domaine avec une résolution qui est environ d'un ordre de grandeur supérieur à celle d'un microscope optique. L'analyse quantitative des phénomènes observés est délicate. En particulier, la pointe magnétique peut modifier la configuration en domaines de l'objet étudié.

Les techniques magnéto-optiques en champ proche permettent, elles, d'approcher des résolu-

tions de l'ordre de quelques dizaines de nm. Un nombre très limité d'expériences ont permis l'observation de structures magnétiques de très faibles dimensions. La technique STM polarisée en spin est en principe la méthode la plus naturelle pour atteindre une résolution atomique dans l'observation d'objets magnétiques. Les expériences réalisées à ce jour ont cependant montré que de grandes difficultés techniques existent et les résultats obtenus ne sont pas pleinement convaincants.

D'autres approches ont été développées : émission d'électrons dépendant de la polarisation de la lumière au voisinage d'un seuil d'absorption ; courant tunnel dépendant du spin entre un semi-conducteur (AsGa) et un matériau magnétique. Des images de haute résolution n'ont pas été encore obtenues en utilisant ces techniques.

Magnétisme auprès des TGE

La diffusion neutronique constitue l'outil par excellence de la détermination *ab initio* des structures et des excitations magnétiques. Son champ d'application est en train de s'élargir de façon significative avec le développement spectaculaire de nouveaux moyens expérimentaux : sources intenses de neutrons polarisés, analyse de polarisation en trois dimensions, écho de spin, diffraction de surface, réflectométrie neutronique.

En ce qui concerne l'étude du magnétisme, les rayons X se distinguent des neutrons de plusieurs façons : ils sont plus sensibles aux couches électroniques, plus sensibles à la surface (au sens large) et forment une sonde locale (EXAFS, "coherent scattering").

L'absorption X et le dichroïsme ou la diffraction magnétique des rayons X permettent d'obtenir des informations (symétrie) sur la nature des électrons à l'origine du magnétisme. La sélectivité chimique de la diffusion résonnante permet d'identifier les porteurs de moments. Pour l'étude des transitions de phase, la diffraction résonnante a montré toute la puissance des RX avec en particulier la mise en évidence de plusieurs échelles de longueur. La diffraction cohérente pourrait être appliquée à l'étude du magnétisme.

Très hauts champs magnétiques

Les bobines supraconductrices peuvent permettre d'atteindre des champs statiques supérieurs à 20 T. Les bobines résistives du type Bitter visent des valeurs supérieures à 30 T. Couplées à des bobines supraconductrices, elles permettront d'atteindre des champs continus de 40 T. Aux valeurs supérieures, les champs appliqués doivent être de type pulsé. Jusqu'à 65 T environ, ils peuvent être non destructifs ; au-delà, les bobines sont détruites à chaque tir. Dans le cadre d'un projet de collaboration européenne, un objectif est de développer une source de champ pulsé de 100 T non-destructif.

La disponibilité de champs aussi intenses devraient ouvrir de nouveaux champs de recherche en magnétisme. Des valeurs de 100 T correspondent en effet à celles du champ moléculaire dans des systèmes magnétiques qui s'ordonnent à des températures typiques de 100 K. Mais les perspectives d'utilisation sont bien plus larges que ce seul domaine.

Génération de seconde harmonique

Dans un matériau illuminé par un faisceau lumineux de durée très brève, la génération de seconde harmonique (GSH) est déterminée par les atomes qui sont en position non-centrosymétriques. Dans les multicouches magnétiques, les effets magnétooptiques (MO) de type GSH sont donc déterminés par les atomes de surface ou d'interface. Des expériences récentes utilisant des lasers femto-seconde ont permis de les mettre en évidence ; elles ont révélé une amplification des phénomènes associés à l'exaltation des effets de puits quantiques. Cette technique novatrice pourrait ouvrir la voie à une imagerie des interfaces et à l'analyse des renversements d'aimantation aux interfaces ; elle permettrait d'étudier la corrélation entre GSH et rugosité d'interface et de tester les états électroniques de surface par spectroscopie MO.

Les effets MO en GSH sont complémentaires par certains points de vue de la réflectométrie de neutrons polarisés. Des études couplées pourraient apporter de précieuses indications sur l'inhomogénéité d'aimantation en profondeur de couches ultra-minces.

2. 5 MICROSYSTÈMES, MICROTECHNIQUES

Les microsyntèmes sont constitués de deux grandes catégories de composants élémentaires : les composants à fonction purement électronique, de caractère amplificateur (transistor, commutateur, porte logique, mémoire, ...) ou passif (résistance, condensateurs, inductances, transformateurs, mémoires sans consommation, ...) et les composants de couplage (mécanique, optique, thermique, chimique, ...).

En attendant l'émergence possible d'une électronique de spin, les fonctions électroniques de caractère amplificateur restent assurées par des circuits silicium, et un problème très important est celui de la compatibilité des différents matériaux et procédés.

Comme composants passifs, les possibilités des matériaux magnétiques restent peu explorées. Le domaine des micro-composants inductifs fait exception, car des besoins précis existent pour des applications dans le domaine des télécommunications.

Le comportement magnéto-mécanique des couches magnétostrictives et les avancées dans l'étude des propriétés de couplage magnéto-galvanique (magnétorésistance, commutateur à spin, ...) ouvrent de nouvelles possibilités pour des capteurs et peut-être pour des composants actifs.

Une utilisation originale des micro-systèmes est pour la mesure physique. Les microsondes de Hall et surtout les micro-SQUID sont des instruments d'une sensibilité inégalée permettant de mesurer le magnétisme d'objets nanométriques. Une autre application est la micro-calorimétrie. Les microsyntèmes pourraient aussi être utilisés pour la génération de conditions physiques extrêmes en utilisant de très petites quantités d'énergie (très hauts champs magnétiques, très hautes pressions).

3 - SUPRACONDUCTEURS ET FLUIDES QUANTIQUES

3. 1 MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS, SUPRACONDUCTIVITÉ

Problématique et enjeux scientifiques : généralités

Nous sommes actuellement à un tournant important dans l'histoire de nos connaissances fondamentales et des applications de la supraconductivité. Peut-être plus que d'autres domaines de la matière condensée, la supraconductivité a subi déjà de vraies révolutions au cours de son histoire, pourtant très brève par rapport à la science des matériaux plus classiques.

En effet, depuis sa découverte, en 1911, jusqu'en 1935, ce phénomène était resté considéré comme une curiosité de laboratoire. Il fut sorti de sa léthargie par la découverte par Meissner du diamagnétisme parfait et celle des équations de London qui impliquaient l'existence d'un état quantique macroscopique. Le tournant suivant a eu lieu à la fin des années 50 avec, d'une part, la théorie microscopique de Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS), et, d'autre part, celle de la supraconductivité à haut champ dans les alliages de type II permettant la réalisation de champs statiques au-delà de 10 Tesla. C'est à partir des années 60 que l'utilisation des supraconducteurs s'est imposée, principalement pour des machines de haute technicité (accélérateurs de particules, champs intenses, et récemment imagerie médicale) où l'utilisation de l'hélium liquide n'était pas un obstacle économique.

Le dernier tournant a été amorcé en 1987 par la découverte de G. Bednorz et K.A. Muller d'oxydes de cuivre mixte de type La_2CuO_4 (dopé) ou $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ dont la température de transition permet maintenant de dépasser 100 K, donc de s'affranchir des servitudes liées à l'hélium liquide. Le record à l'heure actuelle de la température de

transition est de 165 K obtenu sous pression sur un cuprate mixte de mercure découvert à Grenoble, en collaboration avec l'Institut Ioffe de Saint-Petersbourg.

Ce dernier tournant est en fait double. La première partie du tournant – la plus visible – est, bien sûr, le spectaculaire progrès en quelques années de la température de transition supraconductrice donnant confiance à une utilisation future très large de technologies supraconductrices, en électronique d'abord (communication hyperfréquences, téléphonie mobile), mais aussi, à plus long terme, en puissance transmise. La seconde partie du tournant a pris au cours du temps une importance croissante par rapport au seul aspect de la température de transition élevée : c'est celui de la découverte de notre ignorance dans la compréhension fondamentale des mécanismes et des interactions électroniques dans ces composés d'oxydes mixtes, dont les propriétés passent brutalement d'une phase isolante, anti-ferromagnétique, à une phase métallique et supraconductrice, par une variation très faible du dopage électronique. Autrement dit, non seulement l'existence même de ces phases supraconductrices constituent toujours un mystère que le puzzle des résultats expérimentaux permet peu à peu de restreindre, mais la phase métallique elle-même, au-dessus de la transition supraconductrice, résiste à une description par le modèle classique du "bon métal" (Liquide de Fermi).

La problématique actuelle se joue donc sur un terrain double :

- d'une part, il faut absolument développer notre connaissance des matériaux de base (et ceux dérivés de cette recherche) et améliorer par tous les moyens leur capacité en courant critique ;
- d'autre part, la découverte des phases conductrices des cuprates mixtes a servi de révélateur à l'importance du problème sous-jacent des propriétés des électrons "fortement corrélés".

Ce sont ces deux enjeux "matériaux supraconducteurs" et "électrons fortement corrélés" que le présent rapport de conjoncture souhaite mettre en lumière. Il faut souligner, avant d'aller plus loin, combien cet essor nouveau de la supraconductivité a joué un rôle moteur pour la coopération entre la

chimie des solides et la physique des solides expérimentale et théorique. Ces trois domaines sont bien développés, en France particulièrement, et leur coopération accrue a permis des progrès rapides dans un contexte international très chaud.

La recherche de nouveaux matériaux

Synthèse et optimisation des cuprates

À l'intérieur de la grande famille des cuprates supraconducteurs, quelque 26 structures cristallographiquement différentes ont été identifiées à ce jour. Celles-ci comportent, outre les plans (CuO₂) conducteurs et supraconducteurs, une architecture variable d'ions assurant la cohésion structurale de l'ensemble, basée sur un petit nombre d'oxydes d'éléments tels que les alcalino-terreux (Ca, Sr, Ba), les lanthanides (Y et terres rares) ou les métaux lourds (Hg, Pb, Tl, Bi). Bien que le rythme des découvertes de nouvelles structures se soit ralenti, il est essentiel qu'un petit nombre de laboratoires bien équipés matériellement et intellectuellement poursuivent cette voie encore très ouverte.

La découverte de matériaux avec une température critique élevée dans lesquels n'interviendraient plus de métaux toxiques reste un défi important. La découverte en 1994 à Caen d'oxycarbonates de cuivre ne comportant que du baryum et du cuivre avec une T_c de 110 K est très encourageante. Du fait de leur métastabilité, ces composés ne sont synthétisés que sous forme de couches minces. D'autres supraconducteurs métastables devraient pouvoir être synthétisés à l'avenir, soit sous forme de couches minces, soit encore à l'état massif par des méthodes de chimie douce.

La température critique n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. La densité de courant critique J_c constitue aussi une limitation à l'utilisation de ces matériaux. L'augmentation de J_c par création de défauts colonnaires par bombardement par les ions lourds observée pour la première fois à Caen dès 1988 a largement été reprise par la communauté internationale. En fait, la création de tels défauts par des moyens chimiques reste un défi majeur pour le chimiste du solide.

Les autres familles supraconductrices

Il ne faut pas perdre de vue, face à la grande famille des cuprates, qu'il existe d'autres avancées remarquables sur les matériaux supraconducteurs :

- Tout d'abord l'émergence de la supraconductivité classique étudiée en régime mésoscopique jusqu'à atteindre la mono-électronique (Saclay, Grenoble).

Un exemple de question en suspens est la variation non-monotone avec la température de la résistance à échelle mésoscopique d'un contact normal-supraconducteur. Une autre question non résolue concerne les manifestations de la supraconductivité dans les grains métalliques pour lesquels l'écartement entre niveaux d'énergie est de l'ordre du gap supraconducteur du matériau massif. L'effet Josephson dans les systèmes à blocage de Coulomb est un autre domaine où de nombreux progrès sont attendus. Le temps de cohérence quantique des circuits à une seule paire de Cooper devrait pouvoir être étudié. La transition supraconducteur-isolant dans les réseaux de petites jonctions Josephson est un phénomène prometteur mais encore mal compris.

- Les supraconducteurs organiques découverts à Orsay en 1981 ont maintenant accumulé une très grande littérature mais occupent toujours une place à part dans la compréhension générale de la supraconductivité à basse dimensionnalité. Un problème tout juste abordé est de comprendre leurs liens éventuels avec les cuprates (Orsay, Toulouse).

- Les phases dites de Chevrel du type PbMo₆S₈ ont été développées jusqu'à produire des fils multibrins malgré de très lourds handicaps de stabilité mécanique à surmonter (Rennes, Alcatel).

- Les fermions lourds du type UPt₃, UBe₁₃ sont des archétypes de corrélations électroniques fortes : certains composés présentent deux transitions supraconductrices successives à très basse température, leur comportement extrême doit servir de test à de nombreuses idées théoriques (Grenoble).

- Les fullerènes dopés de type K_3C_{60} constituent à l'heure actuelle une classe très à part de matériaux, paradoxalement bien décrits par la théorie BCS. Contrairement aux cuprates, ils sont difficiles à synthétiser et surtout à manipuler en laboratoire.

Les propriétés physiques

L'utilisation future des cuprates supraconducteurs passe par la maîtrise de courants critiques importants. Cela constitue un des défis les plus difficiles à résoudre, car cette capacité exige une maîtrise parfaite des défauts d'ancrage des vortex et donc une bonne compréhension de leur dynamique. Ce problème renvoie à la recherche de base. On peut donc diviser l'effort expérimental et théorique actuel en trois grands domaines (se recouvrant souvent) :

- La physique des vortex dans les phases cuprates : comment les utiliser ?
- La physique fondamentale de la supraconductivité à haute température : comment ça marche ?
- La description de l'état normal métallique et isolant anti-ferromagnétique : comment et pourquoi peut-on passer de l'un à l'autre ?

Plutôt qu'une énumération exhaustive de l'ensemble des mesures physiques nécessaires pour répondre à ces trois interrogations, il ne sera mentionné ici que les idées nouvellement établies et qui font rapidement progresser chacune d'elle :

- La découverte en 1995 de la transition de fusion du réseau de vortex (coopération Israël/France/États-Unis) constitue un phénomène nouveau prédit en 1985, d'importance capitale pour la compréhension de la dynamique des vortex. Il doit trouver sa confirmation dans la plupart des propriétés mesurées.
- La symétrie du paramètre d'ordre supraconducteur est anisotrope, vraisemblablement avec une forte composante de type "d" engendrée par les interactions électroniques, c'est sans doute là un des caractères les plus originaux des phases cuprates HTSC. Un ensemble convergent de preuves expérimentales est en cours de dévelop-

pement : dépendance en température de la longueur de London, photoémission, transmission infrarouge, jonctions Josephson sur tricristaux, Raman.

- La physique de l'état normal a réservé de nombreuses surprises : il semble qu'une idée centrale simplificatrice est celle de l'existence d'une bande interdite dans les excitations électroniques de spin à l'état métallique : ceci se manifeste aussi bien dans la susceptibilité que dans la résistivité, la conductivité optique et la relaxation nucléaire. Là aussi il s'agit d'un ensemble de propriétés complètement originales en physique de la matière condensée.

Ces trois idées nouvelles sont génératrices elles-mêmes de nombreux prolongements dépassant largement le cadre de la supraconductivité à haute température.

Applications

L'utilisation croissante des cuprates supraconducteurs suit de très près les progrès accomplis par la recherche fondamentale : c'est là que le CNRS doit jouer pleinement son rôle d'initiateur de l'innovation.

Il faut situer la demande concernant les supraconducteurs dans l'évolution générale des économies d'énergie à long terme, obtenues par l'élaboration de matériaux optimisés pour leur densité de courant critique. En dix ans, une amélioration de trois ordres de grandeur a été acquise mais la production à large échelle n'est pas encore prête. L'autre tendance lourde de la demande concerne la densification des communications sur un spectre de fréquence très large.

Ceci implique une sélectivité de plus en plus difficile à garantir : l'électronique supraconductrice offre un moyen élégant et économe de résoudre ce problème qui conditionne un marché en développement constant.

Les grands domaines d'application en électronique sont en effet :

- la communication par satellites et téléphonie mobile (récepteurs à faibles bruits, antennes refroidies HTSC, filtres à bandes étroites) ;

- les systèmes radar (oscillateurs à faible bruit donnant une sensibilité accrue) ;

- l'électronique digitale : RSFQ (rapid single flux quantum), logique, utilisation dans les ordinateurs avec un gain de cinq ordres de grandeur sur la puissance dissipée et deux ondes de grandeur sur la vitesse d'horloge (supra classique) et deux autres avec les cuprates HTSC.

3. 2 SUPERFLUIDES

Le thème des solides et liquides quantiques concerne les propriétés fondamentales et les applications de l'hélium et de l'hydrogène. Condensé sous forme solide ou liquide, l'hélium fournit une grande variété de systèmes-modèles expérimentaux pour l'étude des Fermions (^3He) et des Bosons (^4He) en interaction. Les recherches dans ce domaine sont par conséquent étroitement associées aux progrès de la théorie de la matière condensée.

L'hydrodynamique de l' ^4He superfluide, l'influence du désordre sur la nature des transitions de phase, la croissance cristalline, le magnétisme à basse dimensionnalité représentent quelques exemples de thèmes actuels. L' ^3He superfluide, dont la découverte vient d'être récompensée par le prix Nobel, est un magnifique exemple de "supraconducteur non-conventionnel". On s'intéresse à présent aux propriétés des super-courants de spin et des défauts topologiques dans ce système, et à leur application dans le contexte des transitions de phase en cosmologie. Ces études impliquent la maîtrise d'une technologie "très basses températures" de pointe, qui donne lieu au développement d'une instrumentation ultra-sensible, en particulier dans les domaines de la bolométrie et de la magnétométrie.

Phases superfluides

• L' ^4He superfluide est redevenu, depuis quelques années, l'objet d'études approfondies. On

observe un développement rapide des théories microscopiques ou phénoménologiques et des calculs numériques pour expliquer, en particulier, la nature des excitations de ce système. Ces théories sont motivées par des mesures très précises du facteur de structure inélastique par diffusion de neutrons.

• L'application de théories issues de la matière nucléaire permet de traiter le cas des systèmes quantiques inhomogènes (films adsorbés, micro-gouttes). L'accord avec les expériences, encore semi-quantitatif, tend à s'améliorer pour le cas de systèmes inhomogènes de bosons en interaction. Le cas des Fermions commence seulement à être examiné théoriquement.

• De nombreux problèmes fondamentaux restent en suspens dans le thème de l'hydrodynamique des superfluides. On sait encore très peu de choses sur la turbulence quantique, et en particulier sur la formation et la dynamique de l'enchevêtrement de vortex. On s'interroge également sur la possibilité d'observer un effet du type Meissner avec un superfluide. En d'autres termes, si l'on met en rotation de l'hélium, celui-ci s'arrête-t-il de tourner à la transition superfluide si la vitesse est suffisamment faible pour que n'apparaisse aucun vortex en son sein ?

• Les superfluides en milieu confiné, systèmes où de l'hélium superfluide remplit les pores d'un milieu de type aérogel, sont encore très mal compris. La présence de l'aérogel introduit un désordre subtil : on pense que ces systèmes appartiennent à une autre classe d'universalité que celle de l'hélium superfluide homogène. La possibilité de travailler sur les mélanges ^3He - ^4He enrichit le problème, introduisant la possibilité de séparations de phases au voisinage de l'aérogel. L' ^3He superfluide confiné offre en outre la possibilité d'étudier l'effet du désordre dans des systèmes quantiques macroscopiques qui présentent des degrés de liberté de spin et d'orbite.

• On est actuellement en mesure d'étudier expérimentalement les propriétés de ^3He superfluide à ultra-basses températures, dans un nouveau régime où les quasi-particules, peu nombreuses, se propagent de manière balistique. Les thèmes nou-

veaux dans ce domaine concernent les supercourants de spin et la formation de domaines macroscopiques quantiques cohérents.

- La *dynamique des transitions de phase* est un thème émergent. On peut citer la dynamique de la formation de condensats de Bose, la création de défauts topologiques (vortex, cordes cosmiques) associées aux transitions avec brisure de symétrie, le rôle du chaos. Dans ce cas l'hélium joue le rôle de système modèle expérimental prometteur.

- On s'interroge actuellement sur la possibilité d'observer la *superfluidité de l'hydrogène*. Les expériences sur l'hydrogène atomique à 3D ou sur les films adsorbés d'hydrogène moléculaire n'ont pas encore permis d'atteindre la condensation de Bose-Einstein.

- La *compréhension liquides quantiques à deux dimensions* a fortement progressé au cours des dix dernières années. L'un des principaux sujets de recherche concerne les liquides de Fermi à 2D, systèmes de Fermions fortement corrélés analogues aux systèmes électroniques. On s'interroge sur la possibilité d'une transition superfluide dans ces systèmes.

- L'*interface hélium solide-superfluide* donne lieu à de nombreux thèmes de recherche (croissance cristalline, transitions de phase, structure microscopique, défauts, etc.).

Phases non superfluides de l'hélium

Les propriétés des phases non-superfluides de l'hélium sont historiquement traitées dans le même contexte. Parmi les thèmes en fort développement, on peut citer :

- Les propriétés de *Liquide de Fermi de ^3He liquide normal*, où la nature des excitations est mal comprise, en particulier à des vecteurs d'onde élevés. L' ^3He polarisé est un sujet encore pratiquement vierge.

- L'*origine du magnétisme nucléaire de ^3He solide (échanges de spin multiples)* semble à présent bien établie. Les problèmes ouverts concernent

la dynamique des ondes de spin et le ferromagnétisme nucléaire de la phase bcc. Dans le cas bidimensionnel (films), la nature de l'échange magnétique nucléaire reste incertaine. Les propriétés magnétiques de ces systèmes ont un caractère 2D remarquable (systèmes modèle).

- De nouvelles expériences en *physique des surfaces* ont mis en œuvre des fluides quantiques, permettant de comprendre le mouillage et pré-mouillage.

Les recherches sur l'hélium ont des retombées directes sur le développement de la théorie de la matière condensée (mécanique statistique des Bosons et Fermions en interaction, physique des surfaces, etc.). Le "système-modèle" hélium permet de vérifier des théories, ou de motiver le développement de nouvelles théories par l'observation de phénomènes nouveaux.

D'autre part, les recherches dans ce domaine donnent lieu au développement d'une instrumentation de très haute technicité, qui est progressivement incorporée par d'autres domaines scientifiques. Les *méthodes de réfrigération* qui étaient "exotiques" sont utilisées dans des laboratoires de radioastronomie, dans l'espace, sur les Grands Instruments. Des *systèmes de mesure* très sensibles continuent à être perfectionnés (SQUIDS haute fréquence, micro-SQUIDS, électronique cryogénique). Les techniques de *bolométrie*, en particulier pour des applications de détecteurs de matière noire, ont gagné en sensibilité en utilisant des techniques cryogéniques de pointe. L' ^3He superfluide à ultra-basses températures semble avoir une grande sensibilité pour détecter des particules élémentaires par la formation de quasiparticules, dont la densité peut être mesurée par la méthode du fil vibrant. La recherche sur les *ondes gravitationnelles* a donné lieu à la construction d'antennes gravitationnelles cryogéniques de très grande taille. Les expériences sur différents systèmes de la physique de la matière condensée font aujourd'hui appel à des réfrigérateurs performants et/ou des champs magnétiques élevés (étude de phénomènes quantiques dans les systèmes mésoscopiques, effet Hall Quantique, etc.).

4 - ÉTATS PARTICULIERS DE LA MATIÈRE : QUASICRISTAUX, VERRÉS, AGRÉGATS

4. 1 INTRODUCTION

Ces trois thèmes (ou types de matériaux) sont caractérisés par l'absence de répétition périodique de l'arrangement atomique. Le physicien du solide est alors confronté à l'impossibilité d'utiliser le cadre conceptuel qui a fondé sa discipline, théorème de Bloch, zones de Brillouin, etc.

Dans cette perspective, une approche féconde de ces quinze dernières années a été l'émergence du concept de *frustration géométrique*, qui s'attache à décrire les situations de conflit entre un arrangement atomique local préférentiel et l'impossibilité pour celui-ci de se propager librement dans tout l'espace. Si ce concept a trouvé de nouveaux champs d'application du côté de la matière molle, la question de l'ordre icosaédrique dans les solides compacts, qui est l'un des axes transverses à nos trois thèmes, y fait office de paradigme.

Au-delà de ces ressemblances, chacun des thèmes est le cadre de recherches qui tendent à mettre l'accent sur les *propriétés spécifiques* associées à un système donné. Ainsi insistera-t-on avec force sur le rôle de la quasipériodicité dans les quasicristaux, et sur le caractère universel d'une "transition vitreuse" et de propriétés particulières à basse température dans les verres, ou enfin sur la rupture de l'ordre à la surface ou bien encore les effets de taille dans le domaine des agrégats.

4. 2 LES QUASICRISTAUX

C'est un domaine très récent puisqu'il démarre par la publication, fin 1984, d'un article montrant un cliché de diffraction ponctuel, de symétrie icosaè-

drique, pour un alliage d'AlMn obtenu par trempe. Au couple *périodicité-symétries permises se juxtapose le couple ordre quasipériodique-symétrie quelconque*. D'emblée les recherches sur les quasicristaux sont marquées par un fort caractère *pluridisciplinaire*, qui va de la mathématique à la chimie-métallurgie. De cette courte mais riche histoire, on peut extraire quelques sous-thèmes et tendances.

A tout seigneur tout honneur, le *matériau* lui-même. Du premier échantillon d'AlMn, métastable et finalement peu ordonné, aux échantillons stables, monoquasicristallins, d'AlPdMn, qui présentent au niveau des largeurs des pics de diffraction une pureté comparable aux meilleurs échantillons cristallins, les élaborateurs ont joué un rôle essentiel, dans les progrès du domaine. Maintenir et améliorer les *moyens d'élaboration* reste une préoccupation constante. La poursuite d'études des diagrammes de phase associés ne saurait être négligée.

La *détermination structurale* a été l'objet d'un effort très intense, en particulier en France, effort que l'on peut juger couronné de succès au regard de la complexité de la tâche. Dans les meilleurs cas, on estime en général que les positions de deux tiers des atomes sont connues avec une bonne précision ; pour les autres positions subsiste une incertitude sur l'existence d'un *ordre chimique* fort et sur le choix entre sites presque équivalents pour lesquels on est alors amené à considérer des occupations "moyennes". Notons que ce niveau, plutôt élevé de la connaissance structurale n'aurait pu être atteint sans les outils conceptuels et théoriques développés en parallèle. Une connaissance meilleure de l'ordre chimique entre les constituants, à travers par exemple les fonctions de distribution de paires partielles, permettrait un affinement de la modélisation, mais éclairerait aussi certains aspects liés à l'énergie de cohésion de ces phases.

Une question lancinante reste en effet celle de l'origine de la *stabilité des quasicristaux*, où s'affrontent plusieurs types d'explications, par exemple entre ceux qui rangent les quasicristaux dans la famille des "composés électroniques", dans les lignées des *alliages de Hume-Rothery*, et d'autres qui tiennent à un effet de *stabilisation entropique*. Par ailleurs, le fait que l'on rencontre des entités

structurales semblables dans les quasicristaux et dans certaines phases cristallines à grande maille qui leur sont parentes suggère qu'elles aient un rôle à jouer (ce qui revient à dire qu'il y a une *échelle pertinente pour l'ordre* aux alentours de 15 à 20 Å). On assiste d'ailleurs à un regain d'intérêt pour ces phases métalliques à structure cristalline complexe (par exemple du genre Frank-Kasper), et pour la question de leurs transformations structurales.

Au niveau des propriétés mécaniques, les quasicristaux sont en général des matériaux très durs (donc fragiles). De plus, une *transition spectaculaire fragile-ductile* a été observée à une température légèrement inférieure à la température de fusion. Des *dislocations* ayant été mises en évidence – à noter que leur caractérisation topologique n'a rien de trivial en l'absence de périodicité –, et que l'on a des raisons de penser qu'elles sont en général peu mobiles dans un quasicristal parfait, il est alors suggéré que le phénomène de superplasticité soit associé à un mécanisme de désancrage des défauts, lié à une mobilité atomique accrue. Cette question de la *diffusion atomique* est elle-même très actuelle, avec des propositions théoriques de canaux de diffusion spécifiques (par "sauts de phasons"), et des expériences (difficiles) en cours.

Dans un autre registre, les problèmes de transport (électricité, chaleur) agitent de nombreuses équipes. Au niveau de la conductivité électrique, les quasicristaux présentent un comportement original, et encore mal expliqué : une *très forte résistivité*, et une évolution avec la température plus proche des semi-conducteurs que des métaux. Avec le temps, nous sommes passés des échantillons de faible qualité structurale d'AlMn, d'une résistivité de l'ordre de 500 cm, aux phases stables et très pures d'AlPdRe, où la résistivité atteint quelques cm. Les conjonctures vont bon train sur la proximité d'une *transition métal-isolant*, et sur les rôles respectifs des densités d'états et de la nature même des fonctions d'ondes électroniques. Notons que sont étudiées également des familles de matériaux périodiques sur une direction et quasipériodiques sur les deux autres, et qui manifestent une nette anisotropie pour leur propriétés de transport. Dans ce contexte, les études expérimentales qui permettent de sonder cette densité d'états près du niveau de

Fermi apportent des informations précieuses. La question du *transport thermique* est également d'actualité (avec un intérêt certain du côté des applications). Certains résultats suggèrent par ailleurs l'existence d'un plateau de conductivité à basse température, un peu comme dans les amorphes, ce qui relance le débat sur la façon dont les excitations se propagent (balistique, diffusif, ...) et sur l'importance éventuelle des interactions anharmoniques. Les études portant sur la *dynamique de réseau*, essentiellement par diffusion inélastique de neutrons, nous renseignent ici sur le degré de pertinence d'une analyse dans l'espace réciproque – une relation de dispersion est effectivement observée près des pics de Bragg intenses, la situation étant moins claire loin de ceux-ci.

Du côté de la théorie et des mathématiques, le champ d'investigation est très large et encore très ouvert. Les *questions géométriques* ont accompagné (parfois précédé) l'investigation structurale. L'autre point mathématique saillant est l'entrée en force de la *théorie des nombres en physique* de la matière condensée. Pour le théoricien de la physique, l'objectif principal est le *calcul des excitations élémentaires*. Entre les études cristallines (où théorème de Bloch et zones de Brillouin ont dès l'aube de la discipline balisé la voie à suivre) et les amorphes, terrain de prédilection du numérique et de la simulation, l'envie est grande de pouvoir utiliser au mieux le degré d'ordre des structures quasipériodiques. C'est possible à une dimension – les premières études sur les spectres électroniques 1d en présence de potentiels quasipériodiques ont d'ailleurs précédé la découverte des quasicristaux –, grâce en particulier à des *approches de groupe de renormalisation exact*. L'analyse des spectres, qui sont extrêmement complexes, utilise des outils "multifractals". Mais la nature des états propres, intermédiaires entre états étendus du type Bloch, et états localisés, reste encore mal comprise. La situation se gâte à partir de deux dimensions, où l'approche par renormalisation, qui devient approchée, a montré ses limites et l'on voit se développer les études numériques. Un thème en expansion est celui de la *diffusion quantique*, où l'on entrevoit des scénarios intermédiaires entre les cas *diffusifs et balistiques*. Notons que ce qui précède s'applique également aux vibrations, traitées dans l'approximation harmonique. Un autre thème inté-

ressant est l'étude thermodynamique des quasicristaux, qui prend par exemple la forme d'une construction d'une *physique statistique des pavages*. Problèmes d'énumération (liés à l'entropie), paysages énergétiques dans l'espace de configuration, aspects cinétiques... Approches analytiques et numériques conjuguent ici leurs efforts.

Ce qui précède, malgré sa longueur, est bien incomplet. Notons au passage l'étude des *propriétés magnétiques*, où l'on relève par exemple une tendance au diamagnétisme qui s'accroît avec la qualité des échantillons ; le thème des interactions magnétiques pourrait être relancé, à un niveau plus local, par l'étude qui s'amorce sur des quasicristaux contenant des terres rares. Citons également d'intéressantes études sur le *comportement sous pression des phases quasicristallines*, ou bien encore sur l'*absorption d'ondes ultrasonores*.

Il faut enfin signaler la question des *études de surface*, qui hante bien des esprits tout en soulevant de nombreuses interrogations. Ce domaine, très important du point de vue des applications (par ex. frottement, corrosion, ...) devrait se développer, par un mouvement naturel de notre discipline qui part d'une connaissance du matériau "bulk" pour s'intéresser aux défauts et aux surfaces, et grâce aux nouveaux outils (comme les microscopies à champs proches) qui en permettent l'étude à une finesse inégalée. Mais on ne saurait ignorer dans le même temps la difficulté à définir une surface "idéale" de quasicristal. Dans ces alliages métalliques le plus souvent ternaires, la réalisation de surfaces "propres", stoechiométriques, se heurte à de nombreuses difficultés, et promet de belles controverses.

4. 3 LES AGRÉGATS

Par agrégat, on entend en général des édifices allant de quelques atomes à quelques milliers d'atomes. D'emblée à la charnière entre physique atomique et physique de la matière condensée, ce thème a vu se développer une activité pluridisciplinaire, élargie à des secteurs de la chimie, importante tant par sa taille que par l'importance des questions fondamentales qu'elle véhicule. Pour le

présenter, nous suivrons ici la voie qui consiste à séparer les thèmes des agrégats libres et des agrégats supportés, les questions de réactivité chimique et les collisions agrégats rapides-surfaces n'étant pas traitées dans ce court texte ainsi que le domaine du magnétisme des agrégats, qui, lui, sera abordé dans le chapitre "magnétisme" des textes préparatoires.

Agrégats libres

On peut distinguer les travaux portant sur les petits agrégats (quelques dizaines d'atomes), dont les géométries sont bien caractérisées, de ceux portant sur les gros agrégats (de l'ordre de mille atomes), qui permettent d'étudier la transition vers le comportement des matériaux massifs. Les mesures d'abondance relative en fonction du nombre d'atomes montrent de façon générique les fameux *nombre magiques associés aux agrégats les plus stables*. Deux modèles, dits *modèles en couche*, permettent de comprendre ces abondances.

Sur la gauche du tableau périodique, et en particulier pour les alcalins, c'est le domaine des modèles en *couches électroniques* : les électrons délocalisés ressentent un potentiel effectif, à symétrie sphérique, et remplissent les niveaux discrets d'énergie, organisés en couches comme pour les atomes isolés ; les agrégats les plus stables correspondent aux couches complètes, les nombres magiques s'obtenant par une arithmétique simple sur les dégénérescences associées au potentiel sphérique (couches s, p, d, ...), et donc indépendante de l'élément chimique.

Du côté des gaz rares, mais aussi des métaux de transitions, les nombres magiques sont reliés à des modèles en *couches atomiques complètes*, où la géométrie des positions atomiques joue un rôle prépondérant. C'est par exemple l'existence de configurations icosaédriques multicouches stables, et la question ouverte du croisement en fonction du nombre d'atomes, des courbes de stabilité des agrégats polytétraédriques (avec des symétries quinaires) et des agrégats reprenant sous forme réduite l'arrangement des phases cristallines macroscopiques.

Très intéressants également au plan fonda-

mental, les *agrégats covalents* sont aujourd'hui en pleine expansion. La nature de la liaison chimique est plus complexe que dans les cas précédents : ainsi le carbone "hésite", en fonction du nombre, entre des formes hybridées diverses (sp, sp², sp³, ou intermédiaires), ce qui implique des dimensionalités effectives variables. Pour les agrégats de Si, on s'intéressera également au passage des empilements compacts (censés donner des comportements de type métallique) à des arrangements tétra-valents tels qu'on les attend pour les grosses structures.

Au niveau théorique, les agrégats libres présentent des perspectives très intéressantes. Nous avons signalé plus haut le modèle simplifié de type jellium. Mais les agrégats forment le système par excellence où, autour des *thèmes de la corrélation électronique*, chimistes quantiques et physiciens du solide peuvent se rencontrer. On note par ailleurs un *développement important des outils de simulation* ; taille réelle et taille de l'objet simulé deviennent comparables, ce qui offre des perspectives de validation ou d'abandon des modèles d'interaction. De même, l'étude de la mise en place, avec la taille, de comportements collectifs dans des systèmes où l'on ne peut pas faire abstraction du caractère fini des objets, recèle de nombreuses questions d'ordre fondamental.

Si l'on voit bien venir une poursuite du balayage large des éléments chimiques, voire des assemblages plus complexes (agrégats bi-métalliques, hydrures, ...), la difficulté de l'étude des propriétés en phase libre induit *une tendance générale à essayer de déposer les agrégats, idéalement sans les perturber, et après sélection en taille.*

Agrégats supportés

L'interaction entre des agrégats et une surface est un thème en forte croissance, compte tenu en particulier des potentialités intéressantes des matériaux obtenus par assemblage d'agrégats. Des techniques de dépôt "basse énergie", qui évitent la fragmentation de l'agrégat, conduisent à des matériaux nano-structurés, où la portée de l'ordre est à l'échelle de la taille des nano-particules, ce qui en fait des matériaux intermédiaires entre des cristaux

et des amorphes. Les questions ne manquent pas : nucléation, diffusion de surface, coalescence, croissance... Sur les couches déposées, on cherchera à mettre en évidence des *effets mémoires*, traces dans la structure atomique du film de l'ordre particulier des agrégats avant dépôt.

D'autre part, le cas extrême de l'agrégat supporté est celui de l'agrégat "emprisonné", du type de ceux que l'on sait fabriquer par des méthodes physico-chimiques avec des micelles. D'une façon générale, les méthodes de *chimie douce* offrent des perspectives intéressantes, mais bien sûr avec problèmes spécifiques (en premier lieu, le paramètre additionnel d'interaction avec les solvants).

4. 4 LES VERRES

Si les thèmes précédents brillaient par leur jeunesse, il n'en est plus de même pour celui des verres, matériaux utilisés par l'homme depuis l'antiquité, et qui a vu se développer une science à forte tradition empirique. Rappelons au passage la distinction historique, que l'on peut juger pertinente ou non en fonction du problème posé, entre les *verres*, matériaux présentant une *transition vitreuse*, et la classe plus large (qui contient la précédente) des solides amorphes – ou encore tout simplement non-cristallins –, qui se caractérisent par la nature de leurs diagrammes de diffraction. Schématiquement, on distingue trois grandes catégories de matériaux non cristallins en fonction de la nature de la liaison chimique : ceux à liaisons non dirigées (métaux et alliages métal-métalloïde) ; ceux à liaisons dirigées (essentiellement covalentes), éléments simples ou alliages avec des éléments des colonnes 4, 5 et 6 ; dans ce groupe, les verres d'oxyde tiennent une place particulière de part leur importance au niveau des applications, avec les oxydes *formateurs*, très covalents, et les oxydes *modificateurs*, plus ioniques ; enfin, dernière catégorie, les verres organiques ou moléculaires, probablement les plus complexes.

Une façon de décrire les propriétés les plus génériques des verres consiste à les suivre en fonction de la température, depuis la phase liquide jusqu'aux très basses températures. Notons que

cette description s'applique bien aux verres traditionnels, obtenus par refroidissement depuis le liquide, mais plus mal aux matériaux obtenus par hypertrempe – ce qui court-circuite un peu l'histoire thermique –, et encore moins aux amorphes obtenus par évaporation ou pulvérisation sous vide.

Partons donc de la phase liquide, dont la structure atomique est fluctuante, pour nous approcher de la température de fusion. Si le système évite la cristallisation, on entre dans le premier domaine intéressant ici, celui du *liquide surfondu*. Jusqu'à la transition vitreuse, le système va voir sa structure atomique se figer progressivement, et sa viscosité croître, jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10^{13} à 10^{14} poises où la phase a un comportement solide et supporte un cisaillement élastique (on parle parfois de transition viscoélastique). Les comportements du solide vitreux sont ensuite parallèles à ceux du cristal. A basse température, les systèmes vitreux présentent de façon générique des modes d'excitations originaux, modélisés – mais sans bon support microscopique – par des systèmes à deux niveaux. Les spectres d'excitations montrent également (essentiellement dans les *verres forts*) d'autres modes, probablement moins localisés, dont la signature est le *pic boson* des expériences de diffusion de la lumière.

Du point de vue structural, on distingue l'ordre à longue distance, absent dans les verres, l'ordre à courte distance, associé le plus souvent à des liaisons chimiques fortes, qui est plutôt bien marqué, et l'ordre à *moyenne distance*, dont la signature expérimentale est dans les oscillations marquées, aussi bien du facteur de structure (dans l'espace réciproque) que dans la fonction de distribution de paires. C'est cet ordre à moyenne distance qui contient de fait toute la complexité du verre, et une bonne théorie microscopique devrait pouvoir relier structure à l'échelle de quelques distances interatomiques et modes d'excitations. On a pu espérer ces dernières années que des approches de type *potentiel mou*, essentiellement portées par l'école russe, seraient le bon candidat. Mais cette approche est moins prisée aujourd'hui. De même, au niveau structural, le rapport entre le degré d'ordre à moyenne distance et le fameux *pré-pic de diffraction* est encore matière à controverses.

Autre approche séduisante, dont certains ont pu penser qu'elle ouvrait la voie à une compréhension de la transition vitreuse, la théorie des modes couplés s'avère aujourd'hui seulement plausible à une température plus élevée (lorsque la viscosité ne dépasse pas 10^2 poises, et essentiellement sur des verres fragiles), et l'on voit difficilement comment elle pourrait décrire les situations beaucoup plus visqueuses. Il y a donc là un domaine encore très ouvert, mais qui manque encore de concepts et d'outils théoriques suffisamment fins.

Il est souvent suggéré que la transition vitreuse soit associée à ce que l'on appelle une "bri-sure d'ergodicité", l'espace de configuration étant alors morcelé en régions qui ne peuvent communiquer (au moins pour des temps correspondant à l'échelle d'une expérience). Ceci rappelle des modèles évoqués pour les verres de spin. L'histoire des relations entre les théories élaborées pour décrire ces derniers systèmes et de celles vouées aux verres "vrais" n'est pas faite que de succès ; pour autant, des concepts ont diffusé et l'on retrouve aujourd'hui un nouvel intérêt à comparer ces deux types de systèmes, notamment sur les questions dites de "vieillessement".

Parmi ces concepts "nomades", on trouve en bonne place celui de frustration. Dans les verres structuraux, les modèles qui traitent de la "frustration géométrique" permettent de définir dans les verres des zones de défauts intrinsèques (lignes ou parois) interrompant des zones moins frustrées (où l'ordre local peut se propager). L'extension spatiale de ces dernières zones correspond au domaine de l'ordre à moyenne distance, ce qui ouvre un lien avec la nature des pics "bosons".

Dans un domaine assez différent, il faut signaler d'intéressantes études de surfaces des verres et en particulier des patterns de rupture, notamment à l'aide de microscopies à champ proche (la fragilité du verre est le point noir au niveau des applications). L'importance de défauts de taille nanométrique sur les propriétés mécaniques a ainsi été mise en évidence.

Les études vitreuses sont consommatrices des grands instruments, au niveau de l'étude structurale (investigation de l'ordre local – total ou partiel – et

de l'ordre à moyenne distance) comme à celui des études dynamiques. La séparation des effets de dynamique et de relaxation est, dans ce cadre, un enjeu important.

De par leur complexité, les systèmes vitreux sont depuis longtemps un domaine de prédilection pour la simulation. Les performances décuplées des matériels ont permis par exemple d'implémenter des potentiels plus réalistes et de pousser plus loin les échelles de temps. Il faut quand même noter que, sur ce dernier point, l'on reste très loin (plusieurs ordres de grandeur) entre expériences réelles et simulées, ce qui semble par exemple interdire à court et moyen terme une étude "brute force" des phénomènes de vieillissement.

Signalons pour finir le domaine très important de l'optique non-linéaire des verres, que nous ne détaillerons pas ici.

CONCLUSION

Lors de la discussion, il est apparu de nombreuses évolutions communes aux différents thèmes. Ainsi l'intérêt croissant vers les systèmes de dimensionnalité réduite et les nanoobjets se

retrouve dans tous les domaines, tant pour les applications potentielles de nouveaux dispositifs que pour la compréhension de mécanismes fondamentaux. Une autre évolution récente de notre communauté est un rapprochement entre les chimistes et les physiciens du solide pour définir les méthodes d'élaboration de nouveaux composés : une collaboration de plus en plus étroite (car très fructueuse) devrait être développée entre les deux communautés. De plus, comme cela avait été souligné lors des journées thématiques de l'année dernière, les applications des nouveaux dispositifs suivent de très près – ou accompagnent – les progrès dans la compréhension des matériaux et orientent de plus en plus les évolutions thématiques.

Les physiciens du solide sont des utilisateurs assidus des grands équipements : sources de rayonnement synchrotron, de neutrons, d'ions lourds et champs magnétiques intenses. Les techniques expérimentales très pointues développées autour de ces grands équipements (nationaux ou internationaux) permettent une caractérisation structurale, électronique et magnétique de la matière tout à fait complémentaire de celle obtenue par les techniques réalisées en laboratoire. De plus, ces grands instruments concernent une communauté très vaste et pluridisciplinaire et constituent des lieux d'échanges permanents et spontanés. Enfin, les théoriciens doivent aussi pouvoir bénéficier de moyens de calcul adaptés à leurs besoins actuels.