

# 06

## Matière Condensée : Structures et Propriétés Electroniques

*Président*  
Etienne BUSTARRET

*Membres*

Fabien ALET  
Thierry BRETAGNON  
Gregory CHABOUESSANT  
Xavier CHAUD  
Claudine CHOPIN-NOGUERA  
Claude DELALANDE  
Didier FELBACQ  
Abdeslem FNIDIKI  
Yann GALLAIS  
Yves HENRY  
Annick LOISEAU  
Dominique MAILLY  
Claude PASQUIER  
Frédéric PETROFF  
Olena POPOVA  
Lucia REINING  
Dimitri RODITCHEV  
Antoine RONDA  
Dietmar WEINMANN  
Pierre-Etienne WOLF

### 1 - INTRODUCTION

A première vue, les grands axes thématiques de la section 6 sont identiques à ceux de l'édition 2006 du rapport de conjoncture. Le découpage alors adopté en quatre thèmes principaux, (a) les semi-conducteurs, (b) la physique mésoscopique, (c) le magnétisme et la spintronique, et (d) les systèmes fortement corrélés, reste en effet d'actualité. Mais cette similitude cache une évolution notable. Relativement découpés dans le passé, ces différents thèmes se rejoignent de plus en plus. Ainsi, la spintronique, héritière de cette électronique de spin que la communauté française et en particulier Albert Fert ont contribué à fonder, fait-elle désormais appel tout à la fois aux matériaux semi-conducteurs, à des concepts de physique mésoscopique, et aux oxydes développés dans le cadre des systèmes corrélés. En physique mésoscopique, de plus en plus d'études impliquent des systèmes où les corrélations électroniques ont des conséquences importantes. Enfin, l'application aux systèmes corrélés de certains concepts initialement développés pour les semi-conducteurs a permis la fabrication d'hétérostructures d'oxydes fonctionnels, ouvrant de nouvelles perspectives tant fondamentales qu'appliquées. Ainsi, non seulement les différents axes thématiques partagent outils et systèmes, mais ils s'intéressent de plus aux mêmes phénomènes ou situations physiques.

Une évolution similaire a lieu entre différentes sections de l'INP. Au-delà des interactions bien établies (avec la section 2 pour la modélisation des systèmes corrélés, la section 5 pour les études structurales, etc.), de nouvelles convergences se développent. Par exemple, l'utilisation de semi-conducteurs pour réaliser des sources de photons uniques ou jumeaux concerne également la section 4. Les nouveaux condensats de polaritons, initialement étudiés en 6, le sont maintenant aussi en section 4 (et 8, à l'INSIS). A l'inverse, les théoriciens de la section 6 (comme ceux de la section 2) appliquent les concepts développés pour les superfluides ou supraconducteurs de la matière condensée aux condensats d'atomes ultra-froids étudiés par les expérimentateurs de la section 4, etc. Les frontières traditionnelles entre ces différents domaines sont également atténues par des regroupements d'unités dans des contours élargis favorisant l'interaction entre chercheurs issus de différentes sections.

Cette transversalité dépasse le cadre de l'INP. Les relations sont évidemment fortes avec la section 8 au sein d'unités de l'INSIS, mais bien d'autres interactions existent, que ce soit au travers de développements instrumentaux, comme avec l'IN2P3 et l'INSU, ou par le biais de la synthèse des matériaux, comme avec l'INC (sections 13 et 15 en particulier). Ces fortes interactions font la richesse du CNRS. Un enjeu majeur pour le futur est d'en assurer une bonne reconnaissance institutionnelle.

Malgré ces évolutions, une présentation selon les quatre axes évoqués a cependant l'avantage de fournir une grille de lecture, et nous l'avons donc maintenue. Nous y avons ajouté 3 axes transverses :

- (i) La théorie et la modélisation, car, si chacun des axes thématiques génère ses propres questionnements théoriques, les méthodes employées pour les aborder, et parfois les concepts sous-jacents, se rejoignent souvent.
- (ii) L'instrumentation, que ce soit à l'échelle des TGIR ou des laboratoires, puisque, de façon symétrique à la modélisation, elle a un caractère fédérateur pour les expérimentateurs. Mais aussi pour souligner le fait qu'une instrumentation innovante est une des clés des succès futurs.
- (iii) Les applications, pour en illustrer toute la diversité à travers quelques exemples d'école.

## 2 - SEMI-CONDUCTEURS

Les semi-conducteurs et singulièrement leurs nanostructures sont au cœur de nombreux développements actuels qui vont de la physique fondamentale aux applications. Ceux-ci découlent de la grande souplesse qu'a le physicien dans la définition des propriétés de ces matériaux. Les méthodes modernes d'épitaxie et la nanostructuration permettent d'imaginer de nouvelles possibilités qui dépassent souvent la simple amélioration des méthodes classiques d'alliage et de dopage et sont du ressort de la physique fondamentale : les systèmes électroniques à zéro dimension (la boîte quantique), à une dimension (le fil quantique), à deux dimensions (les trous quantiques) sont fondamentalement différents du matériau massif. Le contrôle et la compréhension du confinement électronique et/ou optique et du couplage exciton/photon qui peut en résulter, ainsi que celui du spin de l'électron, objectifs fondamentaux actuels de ce domaine, rapprochent encore les semi-conducteurs de la physique mésoscopique et du nanomagnétisme. Au-delà de prétextes applicatifs parfois galvaudés, nous verrons qu'un certain nombre de sujets sont également stimulés par les contraintes d'une éventuelle application industrielle en rupture.

### 2.1 ELABORATION

Dans le domaine des semi-conducteurs, la fabrication des échantillons (matériaux, métamatériaux, nano-objets et dispositifs) est une étape clef de la démarche expérimentale, indissociable de leur caractérisation physique et de leur modélisation. L'obtention des effets physiques recherchés requiert en outre souvent de combiner croissance et nanostructuration.

C'est certainement dans le domaine des matériaux à large bande interdite (« grands gaps ») : Sélénures, nitrures, oxydes dont ZnO, SiC, Diamant, etc.) qu'il reste le plus d'efforts à fournir, car il est difficile de leur trouver des substrats en accord de maille, ou des dopants des deux types. Le silicium tend à concurrencer le saphir comme substrat pour la croissance de GaN; ZnO et GaN pourraient se servir mutuellement de substrat. La taille et la qualité des substrats de SiC et de diamant progressent nettement. L'adjonction du phosphore au semi-conducteur GaMnAs améliore ses propriétés magnétiques, de même

que l'antimoine dans GaAsN. On sait désormais obtenir des boîtes quantiques (parfois alignées) auto-organisées à l'interface de semi-conducteurs à grand gap par effet de contrainte, ouvrant cette physique des boîtes à un domaine spectral différent du proche infrarouge (IR). Afin d'éviter de forts champs piézo-électriques internes, on élabore des structures non polaires selon des directions de croissance moins classiques.

Signalons une retombée de la physique de SiC : par traitement thermique d'une surface de ce composé, on sait obtenir des monocouches de graphène. L'engouement de la physique fondamentale pour ce matériau 2D à gap nul et à relation de dispersion linéaire sera d'autant plus justifié que l'on saura obtenir des échantillons de grande taille, à dopage contrôlable par action d'une grille.

C'est peut-être l'obtention de nanofils quantiques semi-conducteurs par des méthodes de croissance « bottom-up » qui constitue le résultat majeur de ces toutes dernières années. Les mécanismes de croissance localisée assistée par catalyseur (VLS : vapeur-solide-liquide) font l'objet d'études approfondies, dans les fils III-V, II-VI et des éléments IV. Comment contrôler le phénomène de nucléation? Pourquoi diverses phases cristallines peuvent-elles coexister dans le même fil? Comment stabiliser ces structures dans leur environnement ? Le succès récent de la structuration tant radiale (structures cœur-coquille) qu'axiale (boîte comme tranche fine d'un fil), la possibilité d'une croissance localisée des fils (à l'aide de la lithographie électronique) et de compatibilité de paramètres de maille très importants sans création de défauts étendus, sont très prometteurs.

Il faut ajouter ici les progrès accomplis par les méthodes de chimie douce. On sait maintenant fabriquer des nanoparticules cœur-coquille où l'épaisseur de la coquille est telle que le semi-conducteur au cœur est protégé des effets néfastes de surface mais pas des effets bénéfiques du confinement. La dispersion de leur taille est de quelques pourcents. La technique s'applique à certains II-VI et bientôt aux III-V avec des applications en biophysique (marqueurs luminescents), en optique quantique (émetteurs de photons uniques) et bientôt dans le domaine photovoltaïque.

### 2.2 CONFINEMENTS

Les méthodes théoriques nécessaires pour décrire les propriétés électroniques des assemblages de semi-conducteurs se trouvent au carrefour des méthodes « top-down » (type fonction enveloppe) et « bottom-up » (type ab initio et méthodes sœurs). Le succès immense de la première méthode a été un atout de la communauté française et lui a permis de diffuser dans les laboratoires, même auprès des expérimentateurs : on parle d'ingénierie de bandes. Si l'on élargit aux propriétés optiques, compte tenu de la complexité des empilements ou nanostructures envisagés par exemple pour les cristaux photoniques ou les métamatériaux, la mise au point de programmes de simulation numérique performants du comportement électromagnétique est devenue nécessaire pour guider la réalisation matérielle. Aussi bien là que pour les méthodes ab initio, qui commencent d'ailleurs à aborder les propriétés optiques ou les matériaux moléculaires, un travail des spécialistes demeure indispensable. Les expérimentateurs auront toujours besoin, le plus près possible d'eux, de

théoriciens compétents qui s'intéressent, au moins à temps partiel, à leur problème spécifique. Prenons garde d'en former suffisamment dans les années à venir.

Un domaine où la physique fondamentale du confinement électronique et l'ingénierie de bandes ont eu un apport primordial est celui des lasers à cascade. Si ces lasers fonctionnent à température ambiante dans le moyen infrarouge, ils sont encore limités aux basses températures dans le domaine térahertz (THz). C'est maintenant dans le contrôle de l'interaction électron-phonon que réside un espoir. La recherche du même type de structures pour les détections IR et THz, pour l'utilisation de propriétés non linéaires par mélange avec les fréquences optiques, est également dynamique. Ces nouvelles sources, auxquelles il faut ajouter celles résultant de techniques de redressement d'impulsions lumineuses ultracourtes, rendent possibles un grand nombre d'études nouvelles, que ce soit sur la dynamique vibrationnelle de grosses molécules (biologiques par exemple) ou sur la spectroscopie et la dynamique d'états électroniques, par exemple sous champ magnétique.

Un autre domaine d'application de l'ingénierie des bandes est celui de la conversion photovoltaïque à haut rendement, où certains assemblages et concepts développés dans d'autres contextes restent inédits. Enfin, l'utilisation des transitions inter sous-bandes des hétérostructures à base de semi-conducteurs à grand gap, rend possible des émissions et des absorptions aux longueurs d'onde des télécommunications (1.5 μm et 1.3 μm).

La physique des microcavités planaires (un ou plusieurs puits quantiques insérés dans une cavité optique planaire composée de miroirs de Bragg) est actuellement dominée par la recherche (dans les matériaux mal contrôlés) et l'obtention (dans les III-V et II-VI classiques) du couplage fort exciton-photon donnant naissance aux polaritons de microcavité. La condensation de Bose-Einstein des polaritons, pendant leur durée de vie, maintenant clairement mise en évidence expérimentalement, fait également l'objet de développements théoriques. Son observation à plus haute température a été effectuée avec des puits de semi-conducteurs à plus grand gap et des systèmes 1D. On peut prévoir dans ce système modèle une grande activité fondamentale (propriétés de spin, cohérence spatio-temporelle, comportement superfluide des condensats, coalescence, etc.). Notons aussi les recherches concernant des systèmes hybrides tels que nitrures et perovskites, nitrures et oxydes, et en dehors des matériaux traditionnels, dans des nanomolécules telles que les nanotubes de carbone.

Ce même couplage fort est maintenant observé dans les boîtes quantiques insérées dans des microcavités 3D, où le confinement optique est obtenu par la fabrication de cristaux photoniques ou par la présence contrôlée d'une boîte dans un fil servant alors de guide d'ondes. La modification des caractéristiques spatio-temporelles de l'émetteur en régime de couplage faible est et sera l'objet de nombreuses études tant fondamentales qu'applicatives, par exemple en vue de la récupération rapide du maximum de lumière d'une diode électroluminescente dans une direction donnée, etc.

Un peu en marge des activités de la section, la nanophotonique présente des opportunités intéressantes de recherche. Les cristaux photoniques ont suscité des espoirs importants qui n'ont pas forcément été suivis de

réalisations. Toutefois, les efforts investis ont permis une excellente maîtrise de la nanofabrication. L'intérêt essentiel des cristaux photoniques se situe dans leur capacité à localiser fortement le champ électromagnétique dans des cavités et à permettre un très fort effet Purcell. Ils sont donc adaptés dans les études concernant l'interaction lumière-matière, en particulier pour la réalisation de laser à bas seuil ou plus généralement la réalisation de gain excitonique.

Dérivés des cristaux photoniques, les métamatériaux sont une nouvelle classe d'objets artificiels possédant des propriétés homogènes, c'est-à-dire une permittivité et une perméabilité effectives, qui peuvent être contrôlées. C'est ainsi que l'on sait fabriquer des structures possédant, dans une gamme de fréquences, une permittivité et une perméabilité négatives. Plusieurs communautés s'intéressent à ces objets, des micro-ondes à l'optique en passant par les térahertz. Récemment, leurs propriétés non-linéaires ont été étudiées, notamment par l'insertion de milieux actifs. De nombreux domaines méritent d'être explorés dans cette direction, en s'intéressant par exemple aux phénomènes collectifs dans des réseaux de nano-objets actifs (QDs), à l'effet laser aléatoire, etc.

Un dernier domaine en émergence est celui de la plasmonique. Il s'agit d'utiliser les plasmons pour propager le champ électromagnétique. Là encore, beaucoup de domaines peuvent être explorés : applications télécom, biophysique, études fondamentales : oscillations de Rabi entre plasmons et excitons, émission de lumière cohérente, effet Casimir, transfert radiatif.

## 2.3 OPTIQUE QUANTIQUE

La génération de photons uniques ou de paires de photons intriqués par une boîte quantique unique, processus nécessaires à la cryptographie quantique, est démontrée à basse température. Il s'agit maintenant d'obtenir une meilleure collection, un haut débit et, plus difficile, d'arriver à un fonctionnement à température ambiante. Dans ce but, l'utilisation de boîtes insérées dans des fils (absence de couche de mouillage, environnement différent) de semi-conducteurs à plus grand gap (énergie excitonique et séparation spectrale supérieures) est prometteuse. L'émission à partir d'impuretés dans les semi-conducteurs en général et des centres colorés très stables et éventuellement magnétiques du diamant en particulier, ne doit pas non plus être négligée.

En revanche, on a plus de mal à croire que les excitations électroniques correspondantes puissent être le support de plusieurs qubits nécessaires au calcul quantique. Cette recherche farouchement fondamentale ne doit plus prendre le prétexte d'une application plus immédiate au motif qu'il s'agit de semi-conducteurs.

Plus originaux et peut-être plus prometteurs sont la mise en évidence et l'utilisation du couplage ultra-fort dans le domaine des térahertz. Le splitting de Rabi peut y être supérieur à l'énergie du photon. On a là un domaine initié plutôt par l'aval mais où la physique fondamentale, au carrefour de l'optique et de l'électronique haute-fréquence, peut apporter de nouveaux concepts.

## 2.4 AUTOUR DU SPIN

Un axe important de la physique actuelle des semi-conducteurs concerne les phénomènes liés au spin, en relation avec l'information quantique et la spintronique. La spintronique au sens large couvre des phénomènes assez différents: contrôle du spin par la lumière, le champ électrique, le courant électrique, ou, à l'inverse, contrôle par le spin des propriétés lumineuses ou du transport électrique. Dans certains cas, les semi-conducteurs pourraient présenter des avantages, par rapport aux métaux en particulier.

Il en est ainsi pour la manipulation cohérente d'un spin unique (porté par exemple par le manganèse) dans une boîte quantique (par exemple de GaAs ou de CdTe). L'objectif est d'utiliser la variable spin comme support de qubit dans une perspective d'information quantique. L'analogie avec la RMN et la RPE, mais sur un spin unique, est frappante et les études nécessaires de la décohérence de spin sont très actives. L'optique y contribue, avec la résolution temporelle sub-picoseconde qu'elle permet. Dans les meilleurs systèmes, le spin des noyaux environnants est limitant mais, inversement, l'aimantation nucléaire peut servir à orienter le spin électronique. Ces études sophistiquées sont utiles pour la compréhension des mécanismes de transport de spin et aussi dans la recherche de systèmes plus performants en tant que support à cette variable quantique cohérente qu'est le spin.

C'est également le cas pour la réalisation de nouveaux dispositifs intégrés, combinant spintronique (manipulation du spin) et électronique traditionnelle (manipulation de la charge), comme le transistor à effet de champ à spin. Les semi-conducteurs peuvent amener ici les avantages d'un temps de vie du spin plus long que dans les métaux, et d'effets résonants liés à la quantification des niveaux d'énergie typique des trous ou boîtes quantiques. Dans ce domaine, un verrou technologique reste la maîtrise de l'injection d'un courant polarisé en spin dans un semi-conducteur et celle de la transformation d'une accumulation de spin en signal électrique. Deux voies sont principalement explorées, l'utilisation de matériaux semi-conducteurs ferromagnétiques dilués (type GaMnAs) et l'élaboration d'hétérostructures associant matériaux semi-conducteurs et matériaux magnétiques.

La première voie nécessite de disposer d'un matériau semi-conducteur ferromagnétique dilué à température ambiante, ce qui n'est toujours pas le cas. GaMnAs a une température de Curie de l'ordre de 200 K. Le ferromagnétisme de ZnO pourrait être dû à des phases métalliques incluses dans le milieu. Il faut donc essayer d'augmenter les températures de Curie par ingénierie de bandes, de contrainte, de dopage (comme pour GaMnAs). On a récemment démontré l'existence, dans le composé GeMn et pour des conditions de croissance particulières, d'une phase ferromagnétique jusqu'à 400 K, bien au-delà de la température ambiante. Cette phase est liée à la présence de nanocolonnes riches en manganèse au sein de la matrice de germanium. La recherche devrait sans doute continuer à être très active dans ce domaine.

La seconde voie consiste à utiliser des structures hybrides ferromagnétiques / semi-conducteur / ferromagnétiques. Une des difficultés est alors l'adaptation d'impédance entre source et drain ferromagnétiques, et canal semi-

conducteur. Ce domaine fait l'objet d'études très actives portant sur le choix du matériau, l'influence du couplage spin-orbite, la nature de la barrière tunnel (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, etc.), l'utilisation de fils quantiques pour limiter le nombre de canaux de conduction concernés, la détection ou la manipulation optique de l'accumulation de spin, etc.

## 2.5 QUELQUES PERSPECTIVES

Une partie importante des études futures concerneront les systèmes hybrides : oxydes/semi-conducteurs pour la photovoltaïque, semi-conducteurs/métaux pour la plasmonique, semi-conducteurs/métaux ferromagnétiques pour la spintronique. La nanostructuration en termes de fils quantiques d'excellente qualité est également très prometteuse. On pourra y combiner propriétés optiques, de transport, et spintronique, y compris dans leurs aspects dynamiques.

Il faut également signaler l'essor considérable des semi-conducteurs organiques, dont l'assemblage et le dopage posent des questions fondamentales quant à la définition des schémas de bandes aux interfaces, mais dont diverses propriétés semblent déjà prometteuses du point de vue des applications à bas coût.

Dans tous les cas, la connaissance fine des matériaux, de toutes leurs propriétés en dehors de toute spécialisation, est nécessaire. Le physicien fondamental saura, on l'espère, trouver de nouveaux concepts et de nouvelles solutions dont se serviront ensuite les applications.

## 3 - PHYSIQUE MÉSOSCOPIQUE

La physique mésoscopique, à l'interface entre les mondes quantique et classique, décrit des situations dans lesquelles le temps ou la longueur de cohérence de phase des électrons sont comparables ou supérieures aux échelles de temps ou longueurs caractéristiques du système. Dans ce régime intermédiaire, la cohérence quantique peut apparaître dans des systèmes comportant suffisamment de particules pour que les concepts de température ou de moyenne statistique gardent leur sens.

Le régime mésoscopique est réalisé pour des systèmes de taille et/ou dimensionnalité réduite si la cohérence de la quantité observée est suffisante, ce qui nécessite souvent que la température et le couplage à d'autres degrés de liberté soient faibles. La combinaison de la physique quantique avec la physique statistique peut alors mener à l'émergence de nouveaux phénomènes qui peuvent dépendre de différents paramètres comme la géométrie de l'échantillon, le désordre, les interactions entre porteurs de charges, et le couplage à d'autres degrés de liberté comme des phonons ou des photons. Ces phénomènes sont d'un intérêt fondamental certain et peuvent en plus présenter un potentiel applicatif important.

Une grande partie de la physique mésoscopique concerne les propriétés électroniques de nanostructures et de systèmes de dimensionnalité réduite : gaz bidimensionnels d'électrons, éventuellement nanostructurés pour créer des formes géométriques ou des topologies particulières telles des boîtes quantiques ou des réseaux artificiels, structures hybrides constituées de composants métalliques, ferromagnétiques, supraconducteurs, de nanotubes de

carbone, ou de fragments de graphène, de molécules uniques ou en petit nombre, etc.

La physique mésoscopique recouvre en partie les domaines de l'électronique moléculaire, de l'électronique de spin, des systèmes pour l'informatique quantique, et également des fermions corrélés, dans la mesure où les interactions entre porteurs sont un paramètre important dans le régime mésoscopique. Certaines situations réalisées avec des gaz atomiques froids dans des pièges optiques relèvent également de cette physique.

### 3.1 ELABORATION

Les objets de la physique mésoscopique peuvent être obtenus par deux grandes voies. L'approche top-down, basée sur les techniques de nanofabrication, est par exemple utilisée pour nanostructurer les gaz bidimensionnels d'électrons, pour fabriquer des structures hybrides combinant métal, supraconducteur, et/ou ferromagnétique. L'approche bottom-up utilise les techniques de la chimie moléculaire ou des phénomènes d'auto-organisation ou d'auto-assemblage. Ces deux approches peuvent être combinées, en particulier lorsqu'il s'agit de contacter des nano-objets (nanotubes de carbone, nanoaimants) pour des mesures de transport quantique.

### 3.2 DECOHERENCE ET IRREVERSIBILITE

Un axe de recherches important consiste à étudier sur des objets mésoscopiques la transition entre le monde quantique et classique, à travers la décohérence en présence d'un couplage au monde extérieur, et les limites quantiques du processus de mesure.

Un volet important de cette thématique est l'information quantique avec des réalisations de bits quantiques (qubits) dans l'état solide et leur manipulation pour le traitement quantique de l'information. Ici, on observe une évolution vers des systèmes qui réalisent de plus en plus la physique quantique de base. Simultanément, des efforts importants sont engagés pour manipuler de façon contrôlée et éventuellement résolue en temps les charges et les spins de petits systèmes (voir par exemple le paragraphe sur la nanospintronique).

Un élément important dans ce contexte réside dans les phénomènes évanescents aux surfaces des substrats, qui influent sur la dynamique et la décohérence des dispositifs quantiques sur lesquels ils sont déposés. Des méthodes de champ proche commencent à être utilisées pour sonder ces phénomènes, qui mériteraient d'être étudiés plus en détail.

Le sujet des nano-systèmes électro-mécaniques commence à se développer en France. Ces systèmes combinent degrés de liberté mécaniques et électroniques, et un but important est d'atteindre le régime quantique pour la composante mécanique. Cela est d'un intérêt fondamental certain et l'effort national mériterait d'être amplifié.

### 3.3 TRANSPORT QUANTIQUE

La description du transport quantique fait

naturellement intervenir les concepts de la physique mésoscopique, puisque le système cohérent à travers lequel on réalise une expérience de transport quantique est inévitablement connecté à des sources de courant et des appareils de mesure macroscopiques, donc classiques.

Une partie de l'effort dans ce domaine concerne les aspects fondamentaux avec la coexistence de concepts classiques et quantiques et l'effet des corrélations électroniques sur le transport. Cela inclut l'étude théorique de systèmes de basse dimensionnalité en interaction forte utilisant le concept de liquide de Luttinger et les études de l'effet Hall quantique fractionnaire, mais aussi les phases topologiques et en particulier les isolants topologiques, une thématique émergente déjà présente en France.

D'autres exemples sont les effets plus traditionnels de blocage de Coulomb ou l'effet Kondo. De nombreuses études s'intéressent non seulement à la conductance, mais aussi au bruit, une quantité qui peut présenter des caractéristiques qui dépendent de la statistique des porteurs de charge et des corrélations.

On peut également signaler le développement de nouvelles approches utilisant des sondes locales. Un exemple en est la microscopie à balayage de grille qui mesure la conductance d'un échantillon en fonction de la position d'une pointe créant une perturbation locale.

Les systèmes au travers desquels le transport est étudié sont souvent nanoscopiques. Cette échelle de taille peut être sélectionnée par la géométrie intrinsèque (fils quantiques, boîtes quantiques dans des structures métalliques et semi-conductrices, nanotubes de carbone, molécules uniques) ou par la technique de mesure, comme dans le cas de petits ensembles de molécules, sondées au sein d'une monocouche autoassemblée en approchant perpendiculairement à cette couche une nanoélectrode ou une pointe AFM conductrice. On peut ainsi étudier l'influence sur les propriétés de transport des interactions inter-moléculaires ou de la nature désordonnée des assemblages moléculaires.

L'électronique moléculaire évolue dans la direction du transport cohérent de spin (à travers molécules, fullerènes, nanotubes de carbone, graphène) et de la manipulation de nano-aimants individuels. L'étude de l'influence des degrés de liberté vibrationnels des molécules sur le transport rejoint la problématique des nano-systèmes électro-mécaniques. Une autre évolution concerne l'étude de molécules fonctionnelles, i.e. portant une fonction de traitement de l'information (mémoires moléculaires, commutateurs utilisant les changements de configuration des molécules, ...). Tandis qu'on observe une certaine activité théorique pour décrire le transport à travers une ou des molécules par des approches numériques et phénoménologiques, le plus grand défi expérimental de ce domaine reste, malgré des progrès indéniables ces dernières années, de créer des contacts bien définis et contrôlés entre molécules et électrodes.

L'étude du transport cohérent dépendant du spin à travers des structures magnétiques présente un intérêt particulier pour le domaine de l'électronique de spin, en particulier les effets de l'aimantation sur le courant et les effets réciproques.

Les systèmes hybrides comportant des éléments métalliques, supraconducteurs et/ou ferromagnétiques, continuent également à être très étudiés, avec le but d'observer individuellement et en compétition les effets de

spin et des corrélations supraconductrices.

L'activité reliée au transport électronique dans les systèmes désordonnés, avec les effets de localisation faible et forte connaît deux développements importants, l'étude de réseaux artificiels avec des effets géométriques et topologiques et l'analogie avec les gaz d'atomes froids.

### 3.4 HAUTES FREQUENCES

A très haute fréquence, quand l'énergie d'un photon devient comparable ou supérieure à d'autres échelles caractéristiques d'énergie comme par exemple l'énergie thermique, de nouveaux effets peuvent apparaître. Le régime de fréquences de l'ordre du GHz est ainsi très intéressant, que ce soit sur le plan fondamental, en tant que sonde de la dynamique du système étudié, ou appliqué.

Il sera important de faire le lien entre les domaines du transport à basse énergie et celui de l'optique, qui convergent vers des systèmes et des problématiques voisins. L'extension de la physique mésoscopique haute fréquence au régime THz, où se manifeste la dualité quasiparticule-plasmon des électrons, est un pas dans cette direction.

## 4 - MAGNETISME ET SPINTRONIQUE

Dans le domaine du magnétisme, la section étudie aussi bien l'origine microscopique de l'aimantation (magnétisme quantique, magnétisme frustré, etc.) que les phénomènes collectifs liés à cette aimantation (domaines, dynamique, manipulation, effets sur le transport électrique, et). Nous décrivons ici ce second axe, le premier étant traité dans la section consacrée aux systèmes corrélés. De façon générale, le dynamisme de cette thématique résulte d'une synergie entre théoriciens, physiciens expérimentateurs et chimistes motivés par le développement de nouveaux matériaux.

### 4.1 NOUVELLES TENDANCES EN MAGNETISME

#### Micro et nanomagnétisme

En micromagnétisme, la plupart des études actuelles concernent l'analyse des arrangements de moments au sein des parois magnétiques ou des configurations de type vortex. Les progrès récents des méthodes expérimentales en termes de résolution spatiale et temporelle (imagerie, transport), comme des méthodes de simulation numérique (codes en éléments finis, prise en compte des effets thermiques, etc.) sont à la base des évolutions dans le domaine. On s'intéresse ainsi à la structure interne de ces objets, à leurs interactions, à leur dynamique ainsi qu'à leur manipulation par différentes méthodes.

A une échelle plus petite, le domaine du nanomagnétisme évolue dans plusieurs directions :

A l'échelle moléculaire, la création de très nombreuses formes de molécules de type agrégats ou molécules-aimants, caractérisées par un cœur organométallique et un milieu de cristallisation, a permis non seulement de

tester les concepts physiques tels que l'effet tunnel de l'aimantation mais aussi de laisser entrevoir la production en masse d'objets nanométriques parfaitement contrôlés, tant du point de vue des propriétés que de la structure et de leur fonctionnalisation. Cette approche « bottom-up » est le fruit d'une bonne compréhension des relations magnéto-structurales de ces matériaux. L'effort de synthèse s'oriente vers l'auto-assemblage de structures de taille modeste pour former des structures en agrégats plus importants ou des structures à dimensionnalité réduite.

Un des systèmes majeurs est celui des « molécules-aimants » qui présentent une barrière d'énergie magnéto-cristalline pilotée par une forte anisotropie uniaxiale. Malgré des recherches intenses, le record de la plus grande barrière d'énergie pour un agrégat moléculaire reste encore de l'ordre de 90K alors que la structure optimale pourrait laisser présager une barrière de l'ordre de 290K.

A une échelle à peine supérieure, un enjeu important pour les applications est d'utiliser des nanoparticules métalliques pour les media d'enregistrement. Pour augmenter la densité, donc réduire la taille, sans compromis sur la stabilité thermique, il faut comprendre et maîtriser les mécanismes de coercitivité dans des amas de quelques nanomètres. Dans ce cadre, les alliages chimiquement ordonnés (CoPt, FePt) à grande énergie d'anisotropie offrent de nouvelles perspectives : la section est impliquée à travers la compréhension de leurs états électroniques, et du rôle qu'ont les contraintes et la taille finie sur leur mise en ordre, leur thermodynamique, et leurs propriétés magnétiques.

Dans le domaine de l'élaboration, une nouvelle tendance est de combiner des approches « top-down » et « bottom-up » (ou auto-organisation guidée). Par exemple, une lithographie classique du substrat permet de structurer des pistes à l'échelle de 100 nm, capables de guider l'auto-assemblage de microdomaines élaborés par auto-organisation. Cet axe est encore peu développé en France.

Il faut enfin mentionner le développement de nanoparticules magnétiques pour les applications, en particulier biologiques (pinces magnétiques, traceurs, hyperthermie, etc.). La contribution de la section à cette activité très interdisciplinaire et couplée à des industriels est d'étudier le magnétisme de ces particules.

#### Ingénierie des interfaces

Les interfaces offrent de nouvelles opportunités pour contrôler le magnétisme et son couplage au transport électronique.

Dans les années 1990, une thématique forte consistait à étudier le moment magnétique aux interfaces et la possibilité d'y induire une anisotropie perpendiculaire. On réalise maintenant que ces interfaces jouent, à travers le couplage au transport, un rôle fondamental en spintronique. Dans cette perspective, sont actuellement développées des études d'ingénierie des interfaces pour contrôler le transfert de spin via la diffusion ou l'effet Rashba.

#### Couplage du magnétisme à de nouveaux degrés de liberté

On s'intéresse ici au contrôle de l'état magnétique

par de nouveaux procédés : champ électrique ou électromagnétique, que ce soit dans le domaine hyperfréquence ou optique (en particulier effet Faraday inverse, i.e. transfert de moment du photon à l'aimantation, ou photomagnétisme de molécules), déformation, température.

La réalisation de nanoréseaux de matériaux photocommutables est une des voies de ce contrôle, malgré l'effet du couplage entre molécules sur le retournement de l'aimantation.

Il est aussi possible de contrôler l'amplitude de l'aimantation ou sa précession (via un changement de direction d'anisotropie) soit directement à travers le champ électrique (semi-conducteurs, métaux aux interfaces), soit indirectement par le biais des contraintes (appliquées en ancrant le matériau sur un piézoélectrique, ou créant des phonons par une impulsion lumineuse femtoseconde) ou par des impulsions hyperfréquences appropriées. L'avantage du contrôle par changement de direction d'anisotropie est d'induire une précession de l'aimantation conduisant à un retournement quasiment sans coût énergétique, contrairement au cas d'un retournement par un champ magnétique.

On peut ainsi manipuler l'aimantation à l'échelle de la nanoseconde. De telles échelles de temps posent de nouvelles questions fondamentales, comme le rôle de la vitesse du son dans l'établissement de la contrainte. Dans cette situation où plusieurs physiques sont mises en jeu (magnétisme, transport, thermique, etc.), les méthodes de simulation numérique, bien développées en France, ont un rôle important à jouer.

Une tendance récente, limitée pour l'instant au Japon et à l'Allemagne, consiste enfin à manipuler l'aimantation par des gradients thermiques engendrant (pour une structure de bandes adéquate) un courant pur de spin, permettant de retourner l'aimantation par effet de couple de spin (effet Seebeck magnétique).

## Développements des microscopies magnétiques

La capacité à déterminer l'état magnétique local d'un système est au cœur des progrès expérimentaux en magnétisme. Selon la géométrie et la nature des matériaux (surface ou volume, cristal ou alliage), diverses microscopies magnétiques complémentaires permettent cette détermination à des échelles de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres. Bien que parfois anciennes, elles sont en forte évolution. La microscopie de proximité à électrons balistiques (BEEM) offre l'intérêt de coupler imagerie magnétique et transport, avec des applications à la spintronique. La France commence à combler son retard dans le domaine de la microscopie tunnel polarisée en spin. Les microscopies plein champ de Lorentz et holographiques, bien adaptées aux études temps réel avec une résolution de l'ordre de 5 nm, sont, elles, déjà bien développées. La microscopie SPLEEM mériterait de l'être. Les tendances actuelles sont d'utiliser ces diverses microscopies pour étudier l'influence de divers stimuli (transport, illumination, etc.) sur le magnétisme.

## 4.2 SPINTRONIQUE

Les développements récents dans le domaine de la spintronique se caractérisent par des progrès notables dans le domaine des matériaux. Par exemple, les jonctions tunnel magnétiques à base de MgO ont permis de mettre en évidence le rôle de la symétrie cristalline dans la conduction tunnel, et de l'exploiter pour obtenir des magnétorésistances tunnel de plusieurs centaines de pourcents à température ambiante. Ce sont aussi de nouveaux effets comme le transfert de spin qui découlent des travaux antérieurs sur la magnétorésistance géante, avec un regain d'intérêt pour les hétérostructures à aimantation perpendiculaire qui présentent certains avantages pour les applications. Enfin, de nouveaux thèmes se développent depuis quelques années à l'interface entre la spintronique et les autres grands domaines de la physique de la matière condensée : semi-conducteurs, physique mésoscopique, électronique moléculaire, oxydes, etc. Ceux impliquant les semi-conducteurs et la physique mésoscopique sont traités dans les parties concernées.

### Transfert de spin

Les effets de transfert de spin recouvrent la physique nouvelle des interactions entre un fort courant de spin et l'aimantation d'un corps ferromagnétique. Le couple associé à cette interaction permet de manipuler l'aimantation sans appliquer de champ, uniquement par transfert du moment angulaire de spin depuis un flux de spins porté par le courant électrique. On peut ainsi manipuler des points mémoire (monodomains) ou des parois magnétiques. Dans ce contexte, comprendre l'interaction du courant polarisé avec une paroi fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux et théoriques. On a pu ainsi observer récemment un décalage Doppler des ondes de spin induit par un courant. Plus généralement, la magnonique (génération, propagation, et interférences d'ondes de spin guidées dans des nanostructures), domaine qui démarre, pose des questions fondamentales sur le couplage magnétisme – réseau en matière condensée.

Un autre axe important est la possibilité d'utiliser le transfert de spin pour la génération d'hyperfréquences. En contrôlant la dépendance angulaire du couple de transfert de spin, on peut obtenir, sans champ magnétique appliqué, une oscillation entretenue de l'aimantation et, par effet magnétorésistif, de la tension aux bornes d'un échantillon dans la gamme du gigahertz. D'autres voies consistent à utiliser un polariseur dont l'aimantation est perpendiculaire au plan des couches, ou des structures à base de vortex magnétiques. De manière générale, ces nanodispositifs appelés STO (Spin Transfer Oscillator) présentent des caractéristiques intéressantes pour une nouvelle génération d'oscillateurs non linéaires dans une très large gamme de fréquences (500 MHz-40 GHz). Toutefois la puissance émise par un seul oscillateur est pour l'instant trop faible pour les applications visées. Les voies explorées pour y remédier visent d'une part à utiliser des jonctions tunnel magnétiques dont la magnétorésistance est bien plus élevée que les vannes de spin métalliques, et, d'autre part, à synchroniser une assemblée de STO afin de réduire la largeur de raie.

Pour conclure, soulignons que, les effets de transfert de

spin étant étudiés dans des objets de basse dimensionnalité (piliers et fils submicroniques), il est fondamental d'associer propriétés de transport, imageries magnétiques et simulations micromagnétiques à l'état de l'art pour progresser dans la compréhension des phénomènes observés.

## Oxydes et spintronique

Un intérêt croissant est porté aux matériaux multiferroïques comme BiFeO<sub>3</sub>. Un tel matériau, à la fois ferroélectrique et antiferromagnétique avec un couplage entre ces deux ordres, peut être combiné à des couches minces ferromagnétiques pour contrôler électriquement leur aimantation, ouvrant une voie nouvelle à une large gamme d'applications.

Les composés intrinsèquement multiferroïques sont cependant peu nombreux. Pour y pallier, on commence à utiliser l'approche des hétérostructures artificielles d'oxydes, décrite dans la partie consacrée aux systèmes corrélés. En combinant ainsi au sein d'hétérostructures des couches minces ferromagnétiques et ferroélectriques (par exemple Fe/BaTiO<sub>3</sub>), on peut obtenir des matériaux multiferroïques artificiels. Des résultats prometteurs ont été obtenus récemment avec des barrières tunnel ferroélectriques.

## Spintronique moléculaire

Le paragraphe consacré à l'utilisation des semi-conducteurs pour la spintronique a souligné le problème de l'adaptation d'impédance entre matériaux ferromagnétiques et semi-conducteurs. Une solution consiste à utiliser des matériaux ayant une vitesse de Fermi supérieure à celle des semi-conducteurs III-V. Les nanotubes de carbone et le graphène sont à ce titre une alternative excitante avec des résultats prometteurs. La combinaison d'un long temps de vie de spin (lié au faible couplage spin-orbite) à une forte mobilité y rendent possible un transport de spin à longue distance, tandis que leur structure électronique permet la modulation par une grille. Ces propriétés ont motivé de nombreuses propositions théoriques d'utilisation dans des dispositifs : barrière, filtre à spin, transport de spin, etc., avec des réalisations expérimentales en émergence.

Au delà des semi-conducteurs traditionnels, certains semi-conducteurs organiques (Alq<sub>3</sub>, pentacène,...) sont maintenant combinés à des matériaux magnétiques. L'idée plus générale d'utiliser des matériaux moléculaires est d'apporter de nouveaux degrés de liberté liés à l'ingénierie à l'échelle moléculaire et à la multifonctionnalité issue de la combinaison de propriétés électroniques, magnétiques ou mécaniques remarquables. Comme pour les composés carbonés, un avantage majeur de ces matériaux organiques est la faiblesse de leur couplage spin-orbite et de l'interaction hyperfine, de par la faible masse moléculaire des éléments qui les composent. Le temps de vie du spin y est ainsi prédict supérieur de plusieurs ordres de grandeur à celui dans les métaux et semi-conducteurs classiques.

Pour optimiser le transport polarisé en spin dans ces hétérostructures organiques, il sera nécessaire, sur le plan conceptuel, d'élucider la nature du couplage électronique aux interfaces, et sur le plan fonctionnel, de contrôler l'organisation en couches minces sur un substrat. Une

solution est l' (auto-) organisation en réseaux grâce aux affinités chimiques, ou même biologiques, des molécules greffées avec leur substrat (or, silice, silicium). Ces techniques sont prometteuses et en plein développement. Un exemple est la réalisation de matériaux multifonctionnels mêlant magnétisme et conduction électrique dans des structures donneur/accepteur composées de couches organiques et organométalliques.

## Nanospintronique

Le rapprochement entre électronique de spin et électronique moléculaire ouvre la voie à une nanospintronique moléculaire visant à manipuler les spins et les charges de dispositifs électroniques. La perspective même lointaine du calcul quantique et l'intérêt potentiel des qubits de spin motivent l'étude du transport dépendant du spin dans des structures 0D. De nombreuses propositions théoriques sont basées sur un nano-objet de quelques nanomètres (agrégat magnétique, nano-aimant moléculaire) connecté à des électrodes ferromagnétiques agissant comme réservoirs de spins. L'intrication du blocage de charge (blocage de Coulomb) et du magnétisme permet par exemple d'envisager le contrôle et la manipulation du spin par la charge et inversement. Les défis à résoudre sont nombreux : élaboration des nano-objets (par exemple par auto-organisation de films moléculaires bidimensionnels), maîtrise des contacts, maîtrise de l'état d'aimantation qui passe par un contrôle des effets d'activation thermique ou quantique, comme du couplage à l'environnement. Les progrès passeront par une forte collaboration entre équipes de chimistes et de physiciens. Il faudra également renforcer les interactions déjà existantes entre les communautés de la physique mésoscopique, de la spintronique, du nanomagnétisme et des calculs ab initio.

## 5 - FORTES CORRELATIONS ELECTRONIQUES

Les systèmes à fortes corrélations, en particulier électroniques, connaissent de nombreux développements expérimentaux et théoriques. La découverte de nouveaux composés aux propriétés très diverses renouvelle continuellement l'étude de problèmes variés tels que la transition métal-isolant, l'origine de la supraconductivité non conventionnelle, le magnétisme quantique, ou la superfluidité. La coexistence au sein d'un même matériau de propriétés parfois antinomiques a donné naissance à de nouvelles directions de recherche telles que les isolants topologiques, isolants en volume mais conducteurs en surface ou les matériaux multiferroïques où les ordres magnétiques et électriques sont présents simultanément. Les études fondamentales sur les systèmes fortement corrélés ont des applications pratiques dans des domaines comme la thermoélectricité, la supraconductivité, les matériaux magnétiques fonctionnels, ...

Une grande richesse des systèmes corrélés est la possibilité de contrôler au moins de manière partielle les propriétés physiques en jouant sur le dopage chimique, la pression hydrostatique ou le champ magnétique. Dans ce cadre, de nouvelles perspectives sont ouvertes par la possibilité de moduler les propriétés d'échantillons très

fins par une tension de grille.

L'étude des composés à fortes corrélations s'appuie sur un ensemble de techniques expérimentales : mesures thermodynamiques ou de transport (électrique, thermique, ou thermoélectrique), méthodes de spectroscopie à l'échelle globale (RMN, RPE, Raman, muons, ARPES, neutrons) ou locale (microscopies et spectroscopies de champ proche), diffractions X ou neutrons, en particulier sur les TGIR.

Toutes ces techniques sont constamment améliorées, en particulier pour les utiliser dans des conditions nouvelles (très fort champ magnétique statique ou pulsé, résolution temporelle, etc.). De nouvelles techniques voient aussi le jour, comme le laser-ARPES capable d'atteindre des résolutions de l'ordre du meV, donc d'accéder aux énergies caractéristiques des corrélations. Les mesures ARPES de type pompe-sonde à l'aide de lasers femtosecondes permettent, elles, de remonter à la dynamique des électrons. Ces techniques pourraient devenir incontournables pour l'étude de la supraconductivité non conventionnelle et plus généralement des systèmes d'électrons fortement corrélés. Le développement en cours de tels instruments au plan national est donc très important pour rester compétitif au niveau international dans l'étude de ces systèmes.

Sur le plan théorique, des développements méthodologiques (e.g. extensions en cluster du champ moyen dynamique - DMFT), algorithmiques (e.g. Monte Carlo Quantique diagrammatique) ou encore des théories effectives de basse énergie (e.g. modèle de dimères quantiques) apportent un gain considérable dans la compréhension globale des diagrammes de phase des composés à fortes corrélations et permettent une comparaison directe avec les expériences.

## 5.1 LES MATERIAUX

Un des éléments marquants des dernières années a été la découverte en 2008 d'une nouvelle famille de supraconducteurs à haute température, à base de fer, plutôt que de cuivre, les pnictures. Leur étude pourrait permettre d'élucider l'origine de la supraconductivité à haute température. Pour être présente dans ce domaine très compétitif, la communauté s'est structurée au plan national avec un dialogue permanent entre physiciens et chimistes. Dans ce contexte, il est très important de soutenir la communauté nationale des chimistes tant la synthèse de monocristaux de haute qualité est cruciale sous peine d'un retard souvent fatal dans la compétition internationale.

Un autre sujet en plein développement est celui des oxydes complexes de métaux de transition. Ces matériaux fonctionnels ont de nombreuses propriétés, modulables entre autres grâce à la stoechiométrie en oxygène, et intéressantes tant du point de vue fondamental qu'appliquée : magnétorésistance géante, filtrage de spin, magnétisme frustré, supraconductivité non conventionnelle, multiferroïcité, propriétés thermoélectriques, etc. Récemment, un progrès important a été de réaliser des hétérostructures d'oxydes fonctionnels en empilant des couches nanométriques avec des interfaces atomiquement abruptes grâce à diverses techniques d'élaboration physique : ablation laser, épitaxie par jets moléculaires, co-pulvérisation réactive, etc. Ces hétérostructures permettent de stabiliser des nouvelles phases et

interfaces et d'obtenir de nouvelles fonctionnalités. En particulier, comme pour les semi-conducteurs usuels, on peut créer un gaz électronique 2D de haute mobilité dans des hétérostructures d'isolants de bande (e.g. LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>). La possibilité de contrôler par une tension de grille, via le champ électrique créé, les propriétés de ces hétérostructures ouvre de nombreuses possibilités pour réaliser des matériaux à fort potentiel applicatif : électronique tout oxyde, structures multiferroïques artificielles couplant magnétisme et ferroélectricité (BiFeO<sub>3</sub>, YMnO<sub>3</sub>), structures de type SrTiO<sub>3</sub>/Nb-SrTiO<sub>3</sub> présentant des effets thermoélectriques, etc. Sur le plan fondamental, ces hétérostructures artificielles tout oxyde offrent un angle d'attaque original pour l'étude des phases électroniques fortement corrélées, un exemple en étant l'induction de la supraconductivité à l'interface entre deux oxydes isolants.

Les défis expérimentaux dans le domaine restent le développement de méthodes de caractérisation d'interfaces, la maîtrise des défauts dans les couches minces, le contrôle et la mesure de la stoechiométrie en oxygène, ainsi que l'intégration des oxydes avec l'électronique à base de silicium.

## 5.2 LA TRANSITION METAL-ISOLANT

La transition métal-isolant (TMI) est un élément fondamental de la physique des systèmes à fortes corrélations, en particulier pour des remplissages de bande commensurables ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ , ...). Les développements théoriques et notamment la DMFT ont permis ces dernières années une amélioration de la compréhension de la physique de cette transition au demi-rempillage.

Des progrès expérimentaux récents ont révélé des propriétés inattendues. On peut citer comme exemples des mesures de photoémission récemment effectuées en France sur le composé archétype tridimensionnel V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui démontrent que la transition du métal vers l'isolant débute à la surface, et la détermination d'exposants critiques 'anormaux' dans des systèmes lamellaires moléculaires. La confirmation d'un tel comportement nécessitera d'étudier d'autres composés tels que les ruthénates. De même, un enjeu pour le futur est de vérifier la prédiction théorique d'une supraconductivité en bordure d'un état d'ordre de charge (dit aussi 'CDW-Mott'), en confirmant les résultats préliminaires obtenus dans des systèmes moléculaires à remplissage  $\frac{1}{4}$ .

## 5.3 LA SUPRACONDUCTIVITE NON CONVENTIONNELLE

Un enjeu majeur de la recherche actuelle sur la supraconductivité non conventionnelle est son lien, voire sa coexistence, avec d'autres phases ordonnées comme l'antiferromagnétisme. La présence et le rôle des transitions de phase quantiques sont ainsi discutés aussi bien pour les composés à fermions lourds que pour les cuprates, les supraconducteurs organiques et plus récemment les pnictures. 25 ans après leur découverte, des résultats majeurs obtenus récemment en France sur les supraconducteurs à haute température critique remettent en cause certaines idées existantes. Par exemple, l'observation à très fort champ magnétique

d'oscillations Shubnikov de Haas suggère que la surface de Fermi est reconstruite dans la phase sous-dopée, dite de pseudogap, des cuprates. Dans cette même phase, des mesures de diffusion inélastique des neutrons ont démontré la présence d'un moment magnétique attribué à la circulation de courants orbitaux dans les plans CuO<sub>2</sub>. Ces découvertes démontrent le rôle important des phases en compétition avec la supraconductivité dans la physique des cuprates.

Actuellement, un gros effort est centré sur la physique des pnictures avec plusieurs projets régionaux fédérateurs et celui-ci doit se poursuivre. Les corrélations étant plus faibles dans les pnictures que dans les cuprates, la comparaison des deux classes de composés permettra de mieux comprendre le rôle de ces corrélations dans la supraconductivité à haute température.

## 5.4 COMPETITION ET COEXISTENCE DES DIFFERENTS ORDRES

Une des grandes particularités des systèmes à forte corrélation est la vaste zoologie d'états fondamentaux accessibles. Ceci conduit à une compétition très forte entre ces états à différentes échelles, macroscopique, microscopique, ou même atomique lorsque le même site est impliqué dans les différents types d'ordre.

A l'échelle macroscopique, la compétition peut induire une séparation de phases comme dans les composés moléculaires, les fermions lourds ou dans les manganites, où elle serait à l'origine de la magnétorésistance colossale. A l'échelle microscopique, elle peut conduire à une modulation du paramètre d'ordre avec un vecteur d'onde précis et la formation de bandes ('stripes') révélée par diffraction X ou neutronique, microscopie en champ proche ou RMN. Ainsi, la coexistence entre la supraconductivité et le magnétisme, très discutée dans les cuprates, apparaît également dans les supraconducteurs sous fort champ magnétique : phases FFLO dans les supraconducteurs moléculaires, phases supraconductrices ferromagnétiques avec appariement triplet ou phases antiferromagnétiques réentrant dans les fermions lourds. Enfin, une coexistence de phases à l'échelle atomique a été observée par RMN dans les pnictures.

La supraconductivité peut aussi être en compétition avec un ordre non magnétique, par exemple avec un état d'onde de densité de charge, comme dans les chalcogénures ou les composés moléculaires. De façon générale, la compréhension de ces phénomènes de compétition ou coexistence est une clef pour mieux cerner l'origine de la supraconductivité non conventionnelle.

Même en l'absence de compétition, deux ordres très faiblement couplés peuvent coexister spontanément, comme dans les composés multiferroïques. Les enjeux actuels sont de mettre en évidence la réalité et l'amplitude du couplage par un ensemble de techniques expérimentales (conductivité optique ou électrique, spectroscopies Raman, imagerie magnéto-optique, etc.), avec comme objectif d'optimiser la synthèse de nouveaux matériaux.

Dans ce domaine, il est souvent difficile de relier les observations complexes, à des mécanismes fondamentaux sous-jacents. De ce fait, une nouvelle tendance consiste à utiliser le principe des hétérostructures artificielles décrit

dans le paragraphe consacré aux Matériaux (en utilisant par exemple des sandwichs ferroélectrique /ferromagnétique ou des jonctions ferromagnétique /supraconducteur).

## 5.5 LES ISOLANTS TOPOLOGIQUES, EFFET HALL QUANTIQUE DE SPIN

Récemment, un grand intérêt a été porté à l'étude des isolants topologiques. Ces systèmes sont isolants dans le volume du matériau, mais possèdent des états de surface métalliques, dont le nombre, caractérisé par un ou plusieurs invariants topologiques, les distingue d'isolants de bande traditionnels. Les isolants topologiques existent en champ magnétique, en deux dimensions (où ils sont le lieu d'un effet Hall quantique de spin, observé dans des puits quantiques (Hg, Cd)Te), mais aussi en trois dimensions dans des isolants finalement assez communs (à base de Bismuth), comme observé en ARPES. Les isolants topologiques constituent un sujet d'étude fondamental, mais pourraient aussi avoir des répercussions énergétiques pratiques en thermoélectricité.

## 5.6 LE MAGNETISME QUANTIQUE ET LE MAGNETISME FRUSTRE

Les corrélations fortes peuvent conduire à une localisation de Mott des électrons. Les seuls degrés de liberté non gelés sont les spins électroniques, acteurs de nouveaux phénomènes magnétiques. Les fluctuations quantiques et la frustration magnétique sont alors des paramètres pertinents à basse température, notamment à basse dimensionnalité et pour des valeurs faibles du spin. Les deux effets peuvent empêcher une mise en ordre magnétique « classique » et stabiliser des états non magnétiques, comme les cristaux de valence ou les liquides de spin. Ces nouveaux états de la matière ne sont encore que partiellement compris : ainsi, la mise en évidence d'un smoking gun théorique ou expérimental pour les liquides de spin, constituerait-elle une avancée importante. De même, comprendre les interactions nécessaires pour stabiliser ces nouveaux états ainsi que les transitions de phase (quantiques ou à température finie) y menant est particulièrement pertinent expérimentalement, tant en présence de variables externes (pression, champ magnétique) qu'internes (dopage).

L'une des caractéristiques des systèmes frustrés est la présence de nombreux états de basse énergie en compétition qui complique l'analyse théorique et expérimentale. Outre les fluctuations quantiques, cette grande dégénérescence peut être levée par des irrégularités structurelles (défauts, encombrement stérique), conduisant à une grande richesse de phases : ordre magnétique, liquide, verre ou encore glace de spins. Récemment, la synthèse de composés très purs et l'utilisation de techniques expérimentales de pointe pertinentes (RMN, neutrons, μSR, champs intenses) ont permis des avancées importantes. Parmi les résultats marquants, citons l'observation de propriétés originales du fondamental (chiralité, dégénérescence topologique), d'excitations magnétiques exotiques (fractionnaires comme les spinons, ou bien monopoles magnétiques dans les glaces de spin) ou de réponse en champ non triviale

(plateaux d'aimantation).

Les perspectives consistent, entre autres, en l'étude de la frustration dans des composés 3D à spin  $\frac{1}{2}$  (territoire largement inexploré), du dopage de phases liquide ou glace de spin (obtention d'une supraconductivité ou d'une transition de Mott inhabituelles) ainsi que du rôle du couplage spin-orbite dans les composés frustrés (relation avec les isolants topologiques).

## 5.7 LES FLUIDES ET SOLIDES QUANTIQUES

Par essence, le terme de fluides ou de solides quantiques s'applique à pratiquement tous les systèmes à fortes corrélations, des liquides de Fermi ou de Luttinger aux cristaux de Wigner électroniques. Dans son acceptation usuelle, il s'applique aux différentes phases des deux isotopes de l'hélium, en tant que systèmes modèles de bosons ou fermions fortement corrélés, même si les systèmes d'atomes ultra-froids, ou plus récemment, de polaritons, rentrent aussi dans cette catégorie.

Ces deux dernières catégories étant traitées par ailleurs dans ce rapport, nous nous restreignons ici au cas de l'hélium. Plusieurs projets concernent la cohérence superfluide. En phase liquide, le confinement dans divers milieux poreux permet d'étudier l'influence du désordre et de la dimensionnalité sur la superfluidité des deux isotopes. La turbulence superfluide de l'hélium 4 est au cœur d'une action concertée entre différents laboratoires. En phase solide, les efforts se sont concentrés sur la compréhension du phénomène mystérieux de supersolidité, dans lequel la délocalisation d'une partie de la matière à l'intérieur d'un solide quantique résulte probablement d'un certain désordre (dislocations et joints de grain). L'hélium 3 normal reste un modèle irremplaçable de liquide de Fermi en forte interaction, avec de nouvelles études du spectre d'excitation par diffusion de neutrons.

Au-delà de cet aspect purement quantique, l'hélium liquide ou solide est étudié dans de nombreuses sections (2, 4, 5, 6, 8). Du fait de ses propriétés spécifiques, comme de ses faibles interactions avec les autres atomes, il est en effet un système modèle pour l'étude de phénomènes très généraux : transitions de phases et phénomènes critiques, mouillage et imbibition, cavitation, cristallisation, phénomènes prédisruptifs dans les liquides isolants, etc. L'hélium liquide ou solide est également une matrice très peu perturbante permettant d'étudier par spectroscopie les propriétés d'atomes isolés, ou leurs dynamiques internes ou réactives. Enfin, l'hélium 3 liquide fortement polarisé par pompage optique est un modèle de liquide magnétique, dont les nombreuses instabilités de spin sont loin d'avoir été toutes élucidées.

## 6 - MODELISATION

Au sein de la section, diverses approches théoriques sont utilisées pour appréhender le comportement quantique des électrons, que ce soit dans la physique des semi-conducteurs (confinement dans les nanostructures, cohérence des excitations de charge ou de spin), le transport (transport balistique, spintronique), les effets de corrélations fortes pilotant les diagrammes de phase (supraconducteurs de basse dimensionnalité ou non

conventionnels, composés à fermions lourds, manganites, cobaltates, ...) les effets de dopage, etc. La difficulté essentielle consiste à prendre en compte les effets de corrélation et/ou de décohérence. Dans le premier cas, une large gamme de méthodes (exactes ou approximatives, analytiques ou numériques) est disponible, et le choix d'une approche en particulier s'effectue selon l'importance des effets de corrélation, le degré de précision inclus dans le modèle étudié ou le pouvoir prédictif demandé. La décohérence, elle, doit être traitée au travers de modèles phénoménologiques par une combinaison d'approches analytiques et numériques.

Un effort important est porté sur le traitement des effets de corrélation par des modèles théoriques et des simulations ab initio quantiques, au-delà des codes à disposition de la communauté (ABINIT, VASP, ...), que ce soit pour la description de l'état fondamental (y compris le développement de nouvelles fonctionnelles d'échange et de corrélation, par exemple pour décrire les interactions de van der Waals), ou pour traiter les états excités électroniques (développement de méthodes spécifiques : TDDFT, MBPT (GW, BSE, etc.), DMFT, etc.). La France a une place reconnue dans certains de ces domaines. Des efforts méritent d'être renforcés concernant des approches en forte expansion telle que le Monte Carlo Quantique. De façon générale, on est encore loin de pouvoir traiter les systèmes très corrélés de manière routinière.

Les approches ab initio sont actuellement développées pour étudier la réponse des systèmes à des perturbations de nature diverse : excitation de phonons et simulation de la réponse Raman, excitation de plasmons et simulation des spectres de perte d'énergie, excitation magnétique et simulation de la réponse RMN, etc. Le traitement du couplage électron-phonon est également important dans la description du transport électronique ou de la supraconductivité.

Toutefois, au-delà de ce niveau quantique ab initio, d'autres outils deviennent nécessaires dès que la taille des systèmes augmente, que les temps caractéristiques deviennent plus longs ou qu'une compétition entre divers états fondamentaux se produit. Dans ce but, des techniques semi-empiriques, dont la paramétrisation est effectuée sur des calculs ab initio, continuent à être développées, telles les méthodes de type liaisons fortes, auto cohérentes ou non (Hartree-Fock semi empirique, DFTB, SMA, etc.). Ces techniques sont à la base de la simulation de nano-objets, par exemple des agrégats métalliques ou les aimants moléculaires de plusieurs centaines d'atomes, dont les caractéristiques magnétiques dépendent fortement de la taille, mais aussi de la forme et de la composition chimique. Elles permettent également de décrire les effets d'auto-organisation des agrégats nus ou fonctionnalisés, des interfaces complexes (systèmes hybrides, hétérostructures, couches minces pour l'électronique ou l'électronique de spin, nano-objets en contact avec leur environnement), des objets complexes (empilements twistés de plans de graphène), etc. Enfin, tout à l'autre bout des méthodes quantiques du point de vue du nombre d'approximations, les méthodes de type fonction enveloppe sont toujours très utiles.

Complémentaire à l'approche ab initio, le traitement d'hamiltoniens modèles décrivant la physique de basse énergie des systèmes fortement corrélés nécessite souvent une approche numérique. La complexité du

problème à N corps quantique décrit par ces hamiltoniens fait qu'il n'existe aucune méthode de résolution générique et efficace.

Dans certains cas, il est nécessaire de traiter exactement les interactions entre particules, sans approximation. La technique de diagonalisation exacte est en pratique limitée par la croissance exponentielle de l'espace de Hilbert. Pour des systèmes 1D, la méthode du groupe de renormalisation de la matrice densité (DMRG) est alors particulièrement efficace. Des concepts provenant de l'information quantique (états produits de matrice) ont récemment permis des avancées considérables dans cette méthode (traitement de problèmes dépendant du temps, de la température). La généralisation de ces concepts (états produits de tenseurs) pourrait permettre dans un futur proche de s'affranchir de la limite 1D. Pour les problèmes de spins ou de bosons en interaction, les méthodes stochastiques (Monte Carlo Quantique) sont probablement les plus efficaces. Une difficulté fondamentale (« problème de signe ») les rend toutefois inopérantes pour les systèmes fermioniques au cœur des considérations de la section (modèle de Hubbard, magnétisme frustré). Une direction future consiste à essayer de minimiser le problème de signe pour les modèles les plus intéressants.

Dans d'autres cas (soit par absence d'alternatives, soit pour des interactions intermédiaires), des méthodes approximatives doivent être développées. Dans cette catégorie figurent les méthodes variationnelles, des méthodes hybrides ab initio / corrélations fortes, telles que (LDA ou GW)+DMFT, et le champ moyen dynamique (DMFT) qui a permis des avancées considérables sur le problème de fermions en interaction, en particulier pour expliquer la transition de Mott. La DMFT transforme le problème originel en celui d'un modèle d'impureté quantique plongée dans un bain auto-cohérent. Le modèle effectif est alors résolu par un solver, généralement une des méthodes numériques évoquées plus haut. Récemment, le modèle effectif a été affiné en utilisant plusieurs impuretés quantiques (cluster-DMFT), et de nouveaux solvers numériques (notamment stochastiques) plus efficaces ont été développés. Ces avancées techniques ont permis de décrire en détail plusieurs caractéristiques du diagramme de phase des supraconducteurs à haute Tc, et aussi d'aborder l'étude de la dynamique des systèmes fortement corrélés, notamment hors équilibre. Elles sont appelées à se développer.

Des efforts importants seront encore nécessaires pour permettre à chacune des communautés ab initio, physique mésoscopique et corrélations fortes de s'enrichir mutuellement. Trop souvent, elles s'ignorent. A ce titre, des participations croisées aux réseaux nationaux (GDR CoDFT ou physique mésoscopique, par exemple) ou internationaux (réseau  $\Psi_k$ , réseau ETSF, ...) revêtent une importance toute particulière pour faire émerger les approches hybrides où les résultats obtenus ab initio permettraient de guider le choix des paramètres introduits dans les hamiltoniens modèles.

En parallèle à toutes ces approches numériques, il est important de continuer à développer des approches phénoménologiques, essentielles pour nombre de thématiques centrales de la section (transport quantique et mésoscopique, effets de décohérence induits par des couplages électron-électron, électron-photon, électron-phonon, ...). En effet, si les techniques numériques et

de simulation sont devenues incontournables en tant qu'approches ab initio pour déterminer la structure de nanosystèmes ou comme approches adaptées au transport (groupe de renormalisation numérique), elles ne permettent pas de résoudre tous les problèmes. Un exemple en est le transport au travers de nanostructures. Si l'approche sans interactions de Landauer a permis de comprendre une quantité énorme de données expérimentales, un verrou persiste pour le transport en présence de corrélations électroniques fortes et/ou de couplages à d'autres degrés de liberté, donc de décohérence. La difficulté est de relier les états multiparticule corrélés et cohérents de la nanostructure avec les liquides de Fermi et la décohérence dans les électrodes pour en déduire le courant électronique, voire le bruit associé. De telles problématiques, qui ne sont pas accessibles directement aux simulations numériques, sont cependant pertinentes pour de nombreuses situations importantes de transport en dimensionnalité réduite comme par exemple en électronique moléculaire, dans le transport à travers des boîtes quantiques (effet Kondo, ...), dans les fils quantiques (où des corrélations de type Luttinger deviennent importantes), pour les systèmes nanoélectromécaniques, et en général lorsque l'on s'intéresse à la décohérence. Pour comprendre les mécanismes en jeu et surmonter les verrous conceptuels, il reste donc indispensable de développer des modèles phénoménologiques minimaux judicieusement choisis et de les étudier par une combinaison d'approches analytiques et numériques.

## 7 - TGIR ET INSTRUMENTATION

Dans toutes les disciplines scientifiques, les progrès conceptuels découlent souvent de développements instrumentaux. En physique, on pense bien évidemment aux Très Grandes Infrastructures de Recherche, mais l'innovation technique a aussi lieu à l'échelle des laboratoires. Dans cette section, nous décrivons, parmi les évolutions récentes du domaine, celles qui sont plus liées aux activités de la section, en dégageant quelques points qui nous paraissent mériter des efforts particuliers.

### 7.1 LES TGIR

Les TGIR jouent un rôle majeur de structuration et d'approfondissement de la recherche. Les TGIR sont le lieu à la fois d'innovations techniques (polarisation de la lumière ou des neutrons, environnements champ intense et/ou haute pression, électronique d'acquisition, développement logiciel) et d'échanges interdisciplinaires entre des communautés que seule la technique commune rassemble. Cela permet d'ouvrir de nouveaux axes de recherche aux interfaces disciplinaires.

Par la lourdeur des investissements requis pour atteindre le meilleur niveau mondial, les TGIR doivent bénéficier à la fois d'un financement pérenne, d'une visibilité à long terme sur les objectifs demandés par les tutelles, de la garantie d'une activité de recherche propre de pointe autonome – seule à même de garantir un excellent niveau de service – et d'un support technique suffisant (techniciens, ingénieurs, bureaux d'études).

## Sources X et neutrons

Les sources synchrotrons de rayons X (Soleil, ESRF) et de neutrons (LLB, ILL) sont largement utilisées pour les thématiques couvertes par la section 6, certains des chercheurs rattachés à cette section contribuant à leur développement et à leur animation. Nous renvoyons au rapport de la section 5 pour une discussion des avancées récentes et des enjeux qui concernent ces TGIR.

## Champs magnétiques intenses

La section est très présente sur les deux sites du Laboratoire National de Champ Magnétique Intense (LNCMI), issu de la fusion en 2009 du LCMI à Grenoble pour les champs statiques et du LNCMP à Toulouse pour les champs pulsés. La gestion des appels à expériences est désormais assurée par un comité de programme unique, ce qui permet une bonne symbiose entre les deux sites. Un projet d'envergure, dans le cadre européen ESFRI, est l'installation entre l'ILL et l'ESRF d'un laboratoire de champs magnétiques intenses permettant d'effectuer sur site des mesures de rayonnement X et de neutrons (coopération ILL-ESRF-LNCMI). La combinaison de ces différents outils ouvrirait une nouvelle fenêtre pour comprendre le comportement de la matière sous fort champ magnétique.

Un enjeu important pour le futur est de minimiser le courant électrique nécessaire à l'obtention de forts champs dans un volume donné. Ceci est crucial, d'une part pour réduire l'effet de l'augmentation du prix de l'énergie électrique, d'autre part pour étendre l'utilisation de forts champs magnétiques à d'autres disciplines, comme par exemple la chimie (RMN en très fort champ) ou la géophysique (champs élevés dans de gros volumes). Pour répondre à cet enjeu, il faut améliorer la conception des bobines résistives (en particulier leur échange thermique), et développer l'usage de technologies hybrides, combinant bobines résistives et supraconductrices à haute température critique.

## Centrales de technologies

Nouvellement intégrées aux TGIR, les centrales de technologies sont un outil indispensable pour la communauté. Celles-ci ont été déclinées selon deux typologies : les grandes centrales et les centrales de proximité.

Dans les grandes centrales technologiques, au nombre de six, on retrouve à la fois des moyens de croissance en épitaxie de matériaux classiques (silicium, arséniures, etc.) et des moyens de nanostructuration. Elles concentrent tous les moyens technologiques nécessaires pour la réalisation d'un échantillon depuis le matériau jusqu'au dispositif monté sur une embase. Les personnels techniques qui soutiennent la centrale permettent de conserver de façon pérenne les procédés développés soit par eux-mêmes soit par les chercheurs technologues. Elles sont structurées en réseau et répondent aux demandes des chercheurs de deux façons : soit en guichet, où la fabrication est totalement prise en charge par la centrale, soit en mode plus collaboratif où le chercheur demandeur est impliqué dans la fabrication et, aidé du personnel technique, participe activement à la technologie.

Les centrales de proximité ont un rôle complémentaire.

Elles permettent aux chercheurs de laboratoires proches disposant souvent de moyens de croissance plus spécifiques, un accès rapide à une technologie moins complexe, ou de combiner plus facilement des techniques hybrides.

Un soutien financier pérenne de ces centrales est absolument nécessaire pour maintenir leur potentiel à la pointe de la technologie. Le futur du LPN qui joue un rôle important pour de nombreux laboratoires de la section est en particulier un sujet qui nous préoccupe.

## 7.2 INSTRUMENTATION

Le terme d'instrumentation recouvre aussi bien le développement de nouveaux systèmes que les approches méthodologiques basées sur l'utilisation de systèmes commerciaux, en passant par l'assemblage de dispositifs commerciaux dans un système original. Au cours du temps, on passe souvent d'un cas à l'autre. Ainsi, les microscopes STM (Scanning Tunneling Microscope) et AFM (Atomic Force Microscope, AFM), complètement construits dans les laboratoires il y a une vingtaine d'années, sont désormais disponibles commercialement. De même, les réfrigérateurs à dilution 3He-4He utilisés pour obtenir des températures inférieures à 0.3 K peuvent être achetés sur plan auprès de différentes entreprises spécialisées. Cette situation, conjuguée à la montée en puissance du financement sur contrat, qui pousse à acheter plutôt qu'à développer, conduit certains à remettre en question l'intérêt de maintenir une forte compétence en instrumentation scientifique au sein des laboratoires fondamentaux. Or, la capacité à développer une instrumentation originale est un des éléments, d'une part de la compétitivité scientifique internationale, et d'autre part des progrès aux interfaces des disciplines. Les exemples, non exhaustifs, qui suivent, illustrent quelques-uns des défis qui ne pourront être relevés qu'en renforçant la place de l'instrumentation au sein des laboratoires.

## Sondes de proximité

L'avènement il y a un quart de siècle des microscopies en champ proche a bouleversé le paysage de la recherche en matière condensée. Basées sur la détection d'un signal issu d'une interaction à courte portée entre une sonde fine (une pointe) et l'objet d'études (surface, nano-objets etc.), ces microscopies ont permis, non seulement une observation aisée du nano-monde, mais également l'étude de celui-ci par l'analyse fine – spectroscopie – de l'interaction sonde-objet. Ces sondes apportent des contributions majeures à la compréhension des systèmes à fortes corrélations comme à celle des nano-objets. En effet, elles permettent d'accéder, à l'échelle microscopique, aux modulations ou aux hétérogénéités d'un paramètre d'ordre (densité électronique dans les ondes de densité de charge, paramètre d'ordre supraconducteur, etc.) ou encore, de remonter à la symétrie du paramètre d'ordre à partir de mesures spectroscopiques locales. Elles donnent également accès aux propriétés de nano-objets individuels au sein d'une collection hétérogène, en s'affranchissant des effets de moyenne des mesures d'ensemble. A ce titre, elles sont aujourd'hui couramment employées pour le suivi *in situ* de la croissance de nanostructures

en surface, dans l'analyse de leur morphologie et dans l'étude de leurs diverses propriétés locales. En permettant une nanostructuration des surfaces, elles sont également au cœur des approches du type « bottom-up ». Ainsi, elles sont devenues incontournables dans la plupart des domaines associés à la section.

Trois tendances de fond sont à souligner :

La première consiste à placer les microscopes en champ proche dans un environnement parfaitement contrôlé : ultravide (ou milieu liquide) pour éviter la dégradation des surfaces ou des nano-objets par l'air ambiant, basse température pour révéler les propriétés quantiques, ou une combinaison des deux. Dans ce domaine en pleine expansion, on constate une « démocratisation » de ces outils performants et leur arrivée massive dans des laboratoires de la matière condensée. Certaines équipes, à la pointe de ce progrès, vont encore plus loin, en mettant au point les microscopes fonctionnant à très basse température (jusqu'à quelques dizaines de millikelvins) et dans des champs magnétiques de plusieurs teslas.

La deuxième tendance, plus instrumentale, s'articule autour du développement de nouvelles microscopies et spectroscopies en champ proche, en exploitant diverses interactions à courte portée. À travers ces interactions, de nouvelles propriétés des nano-objets sont étudiées, comme les interactions inter-particules, leur propagation, la portée des interactions, les propriétés de cohérence. Ces nouvelles microscopies en champ proche sont diverses (microscopies à sonde magnétique, électrostatique, à sonde de Kelvin, en champ proche optique, d'électrons balistiques et polarisés en spin) et ne cessent de s'améliorer. Ainsi, des améliorations significatives en détection de courants tunnel ont permis l'étude de molécules uniques, de leur couplage avec divers environnements (substrats métalliques, semi-conducteurs ou isolants ultra-minces), de leurs spectres vibrationnels, etc. Un autre exemple est la fonctionnalisation des pointes STM (ou sondes AFM). On peut ainsi réaliser une spectroscopie tunnel résolue en spin, utilisable pour l'étude du magnétisme des nano-objets individuels de la spintronique.

La troisième voie consiste à utiliser la sonde d'un microscope en champ proche comme un moyen de perturber très localement un objet unique pour en mesurer la réponse. Elles sont très répandues en optique en champ proche (l'exaltation du champ au voisinage de la pointe métallique fine permettant une détection en champ lointain). Ces approches commencent à être employées dans d'autres domaines : l'étude de l'influence du champ électrique local sur le comportement d'un nano-circuit cohérent par microscope à balayage de grille en est un exemple.

## Détection à basse température

De l'astrophysique à la physique des particules en passant par la biologie et l'imagerie médicale, de nombreux domaines utilisent des détecteurs refroidis pour gagner en résolution, sensibilité, ou vitesse, soit à travers la réduction du bruit thermique, soit à travers des effets spécifiques aux basses températures comme la supraconductivité. Des bolomètres à semi-conducteurs refroidis en dessous de 100 mK sont ainsi utilisés pour détecter la matière noire (30 kg de bolomètres refroidis à 20 mK dans Edelweiss II) ou pour la mesure de l'anisotropie du fond diffus

cosmologique (satellite Planck), des détecteurs à base de jonctions Josephson donnent accès à l'infrarouge lointain, etc.

Parmi les enjeux actuels figurent la mise au point de matrices de détecteurs pour l'imagerie (médical, astrophysique, ...), et de méthodes de multiplexage pour lire ces matrices avec un nombre limité de connexions électriques, le développement de nouveaux concepts de détection, mettant en jeu supraconductivité (détecteurs à inductance cinétique), physique mésoscopique (mesure de charge), ou superfluidité (bolomètre à He3 superfluide), et celui de détecteurs couplés mesurant charge et énergie (discrimination de la matière noire). Dans ce domaine, où les progrès dépendent souvent d'un accès aux centrales de nanofabrication, le paysage national est bien structuré, avec de nombreuses collaborations entre organismes, et l'existence d'une communauté bien identifiée.

## Cryogénie

La détection à basse température nécessite également d'atteindre des températures inférieures à 4 K. Si les méthodes associées sont bien établies, l'utilisation de la cryogénie aux interfaces nécessite souvent le développement de solutions spécifiques dans lesquelles le maintien de l'expertise des laboratoires maîtrisant les basses températures est essentiel. Edelweiss II, déjà cité, a nécessité la conception et la construction d'un réfrigérateur à dilution spécialement adapté. Le projet Eureka de détection de la matière noire impliquera le refroidissement de plusieurs tonnes de détecteurs à une dizaine de millikelvins. À une échelle beaucoup plus modeste, le développement de réfrigérateurs 1 Kelvin spécifiques est indispensable à la mise en œuvre de concepts innovants, allant de la gravure FIB à l'imagerie médicale par RMN.

A côté de solutions traditionnelles, certains projets ont fait germer de nouvelles solutions, comme la dilution sans gravité pour la cryogénie spatiale ou la nanoréfrigération de nanostructures par effet Peltier supraconducteur,... C'est un domaine en évolution, et dont l'importance pourrait être renforcée par les incertitudes qui pèsent sur l'approvisionnement en 4He, mais surtout en 3He. Dans ce contexte, on peut aussi s'attendre à une évolution des techniques alternatives (tubes pulsés) dans laquelle il serait stratégique de développer des synergies entre le CNRS et les autres organismes.

## RMN à très haut champ

Les champs magnétiques intenses permettent des gains très significatifs en sensibilité et en résolution en RMN. Actuellement, une convergence d'intérêts se dessine autour de la RMN en champ très intense, rapprochant chercheurs en science des matériaux, chimie ou biologie d'un côté et physiciens de la matière condensée de l'autre.

Les premiers bénéficient d'une TGIR « RMN très hauts champs » (jusqu'à 23.5 Tesla). Les seconds, initialement motivés par les états électroniques ou magnétiques nouveaux induits par le champ dans les systèmes d'électrons corrélés, ont déjà repoussé les limites de la RMN dans les aimants résistifs continus (34 T au LNCMI-

Grenoble). Un projet de RMN en champ pulsé (60 T) est également en cours de développement au LNCMI-Toulouse.

Les retombées en instrumentation RMN (sondes, électronique GHz, stabilisation des fluctuations temporelles du champ par « spin-lock » RMN, etc.) permettent aujourd’hui d’employer la RMN en champ résistif pour la chimie et la science des matériaux. Les perspectives de progrès sont encore grandes avec l’importation de techniques haute résolution (rotation à l’angle magique, etc.) dans ces champs résistifs. A l’inverse, d’autres projets visent à exporter les techniques RMN spécifiques de la physique du solide (basses températures, champ variable, etc.) dans le domaine de la chimie ou de la biologie pour l’observation des noyaux d’ions paramagnétiques.

## Hautes pressions

Les techniques de pression permettent de mettre en évidence des phénomènes physiques remarquables (record du monde de température critique d’un supraconducteur, étude de points critiques, etc.). Si les cellules à enclumes diamant représentent la seule technologie possible pour les mesures de type diffraction (RX, synchrotron, neutron, Raman, etc.), les mesures de RMN et de transport électrique et thermique font également appel aux cellules à pression de gaz ou à clamp. Le ‘réseau hautes pressions’ du CNRS fédère les différentes communautés utilisant la pression (Physique, Chimie, Sciences de la Terre, etc.) ce qui permet un échange technologique fructueux.

Dans le futur, la pression restera un outil de premier plan pour explorer de nouveaux états électroniques à toute température, permettant ensuite la synthèse de nouveaux composés, ou pour étudier les points critiques. Il faudra veiller à maintenir l’environnement spécifique nécessaire pour adapter cette technique aux environnements délicats (champs magnétiques intenses - pulsés en particulier, spectroscopie Raman, conductivité optique, etc.), que ce soit en laboratoire ou dans les TGIR.

## 8 - APPLICATIONS

Les applications des systèmes étudiés par la section sont souvent développées en interaction avec d’autres sections, en particulier la section 8, ou en collaboration avec d’autres acteurs, institutionnels ou industriels. Sans prétendre donner un panorama exhaustif, quelques exemples permettent d’illustrer la richesse des études menées dans les différentes thématiques décrites ci-dessus.

La physique des semi-conducteurs est au cœur de nombreuses recherches à visée applicative : éclairage blanc, composants de puissance, optoélectronique, photovoltaïque, etc. Ainsi, les diodes à base de GaN et les hétérostructures associées (GaN/AlN, GaN/InN) occupent-elles maintenant la deuxième place derrière le Silicium en termes d’applications. Le passage de l’UV au bleu, et bientôt au vert, a reposé sur la levée de plusieurs verrous scientifiques (compréhension des champs piézoélectriques, réduction des effets Auger). Le ZnO et ses hétérostructures souffrent encore de la difficulté d’obtenir un dopage p. Mais la grande valeur des énergies

de corrélation électron-trou peut conduire à des propriétés originales, même à température ambiante.

Dans le domaine de l’infrarouge proche, l’utilisation de boîtes quantiques à base de GaAs ou d’InP permet d’augmenter la fréquence de répétition par rapport aux systèmes à puits quantiques. Mais l’intérêt primordial est que la qualité et le contrôle des échantillons permettent de comprendre l’ensemble des phénomènes physiques en jeu et d’identifier ceux limitant l’efficacité.

La section contribue également à améliorer les performances des dispositifs électroniques à base de semi-conducteurs, à travers les ruptures avec les technologies et les concepts existants. C’est le cas des composants habilités à travailler dans des conditions extrêmes (température, pression, environnement chimique, puissance). Des recherches amont destinées à améliorer les propriétés de transport des matériaux grand gap sont nécessaires de ce point de vue, aussi bien sur le diamant que sur les polytypes de SiC, le GaN, et ZnO.

En imaginant des processus nouveaux d’oscillation dans les nanotransistors, on sait depuis peu générer des radiations térahertz dans un schéma de transport électronique, alternatif au schéma optique des lasers à cascade. Cette idée, issue de la physique théorique il y a une dizaine d’années, est maintenant confirmée dans toutes les filières de la nanoélectronique (Silicium, GaAs, GaN) et est sur la voie du développement industriel. L’amélioration de leur efficacité passera par la résolution de nombreux problèmes fondamentaux : disparition de modes inutiles, meilleur couplage aux antennes, etc.

La miniaturisation des dispositifs nanoélectroniques repose sur de nombreux concepts de la physique mésoscopique. Ce domaine est également très important pour le développement de dispositifs alternatifs à la technologie actuelle, opérant éventuellement dans le régime cohérent. Des efforts concrets existent déjà dans les contextes de la nanomécanique et de la nanoélectronique. Enfin, les effets de la physique mésoscopique sont au cœur de la métrologie moderne.

Les matériaux magnétiques sont d’une grande importance dans des applications liées à la transformation de l’énergie. Les matériaux magnétiques durs permettent la fabrication de moteurs électriques de très haute densité énergétique, importants pour la traction automobile et la génération d’électricité (éoliennes). La priorité ici est la recherche de nouveaux matériaux dont les propriétés de coercivité seraient préservées jusqu’à 180°C et au-dessus. Dans le domaine des matériaux magnétocaloriques qui pourraient remplacer progressivement les fluides utilisés dans les systèmes frigorifiques ou les pompes à chaleur, l’objectif est de mettre au point des matériaux dont les propriétés magnétiques varient fortement dans un domaine étroit de températures. Ce type de recherches tirerait un grand bénéfice d’études fondamentales en amont, malheureusement encore trop peu nombreuses.

L’utilisation d’agrégats moléculaires ou molécules-aimants pour des applications industrielles comme le stockage de très haute densité, ou, dans un futur lointain, les ordinateurs à logique quantique, se heurte à de nombreuses difficultés qu’il faudra surmonter : réaliser des barrières d’énergie plus élevées, surmonter les phénomènes de décohérence quantique, organiser proprement les molécules sur des supports, etc. En revanche, certaines molécules (matériaux photomagnétiques à transition de spin)

possèdent deux états de spin séparés par une barrière d'énergie trop élevée pour être franchie à température ambiante. Elles permettent d'ores et déjà de réaliser des systèmes magnétiques bistables manipulables par activation thermique ou optique (capteurs ou actuateurs) et d'envisager un stockage haute densité à température ambiante.

En spintronique, la première grande classe d'applications se situe dans le domaine des capteurs. L'utilisation de la magnétorésistance géante ou tunnel dans les têtes de lecture des disques durs en est l'exemple le plus connu, mais il n'y a plus d'acteurs de l'enregistrement magnétique en Europe. Par contre, au niveau de l'hexagone, des équipes académiques et des industriels travaillent en partenariat pour développer des capteurs pour l'automobile, le médical, le contrôle non destructif et le spatial. Un autre domaine d'importance est celui des mémoires magnétiques non volatiles (MRAM) dont la deuxième génération utilisera la technologie du transfert de spin, phénomène exploité aussi pour la réalisation de nouveaux composants radiofréquences. Enfin, des perspectives prometteuses apparaissent pour la logique magnétique programmable et les memristors pour la simulation de réseaux neuronaux.

La plupart des systèmes à fortes corrélations débouchent sur des applications potentielles. On peut citer les propriétés thermoélectriques remarquables de nombreux composés à fortes corrélations (clathrates, skutterudites, alliages d'Heusler, phases de Chevrel ou oxydes, mais aussi isolants topologiques comme Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, le seul matériau ayant connu un développement industriel significatif), les applications de la supraconductivité au stockage et au transport de l'énergie, la possibilité d'utiliser le pilotage de la transition métal-isolant des manganites par un champ pour réaliser de nouvelles mémoires non-volatiles, les RRAM (Resistive Random Access Memory), les matériaux multifonctionnels comme les multiferroïques, etc.

Exploiter au mieux ces nouvelles possibilités nécessite d'élucider le rôle des divers effets physiques (par exemple pour les applications thermoélectriques, dimensionnalité, taille finie, corrélations électroniques et couplage spin-charge-réseau) et de comprendre les mécanismes sous-jacents. Ceci passe par une étroite collaboration entre chimistes, physiciens expérimentateurs et théoriciens, dans laquelle les chercheurs de la section ont toute leur place.

## 9 - CONCLUSIONS

L'image globale qui se dégage de ce panorama est celle d'une recherche dynamique, en prise sur les évolutions de la physique de la matière condensée à l'échelle internationale. Un point frappant est le développement des interactions entre communautés, au sein de la section comme entre sections. Il faut souligner le rôle essentiel qu'ont les différents GDR à cet égard. A des échelles différentes, mais toujours pertinentes, les GDR structurent des communautés, jettent des ponts entre différents domaines, contribuent à l'émergence de nouveaux sujets, ou favorisent l'ouverture vers les industriels. Il est important de veiller à ce qu'ils continuent à bénéficier d'un soutien financier significatif.

Les succès présents ne doivent pas faire oublier que les résultats obtenus ont été construits sur toute une culture,

aussi bien théorique qu'expérimentale. Ainsi, les concepts à la base de la physique du graphène ont été énoncés dès les années 1950. De même, les condensats de polaritons sont le fruit de nombreuses années d'efforts expérimentaux. Enfin, l'essor de l'électronique de spin, reconnu récemment par des prix Nobel dont un français, est en particulier bâti sur des études fondamentales menées dans les années 1970. Ces quelques exemples montrent toute l'importance d'une continuité dans l'expertise scientifique, au-delà d'effets de mode qui tendent à focaliser une quantité importante des ressources sur quelques sujets chauds.

De ce point de vue, il faut veiller aux conséquences de la montée en puissance du financement sur projet à court terme à travers l'ANR (depuis 2005) ou d'autres actions contractuelles. Dans la situation hautement compétitive actuelle (taux de succès des projets ANR inférieur à 25%), et compte tenu d'une tendance actuelle à vouloir jauger la qualité à travers des indicateurs chiffrés (bibliométrie réductrice), les chercheurs pourraient être tentés de renoncer aux sujets à la marge, et de se concentrer sur les sujets les plus étudiés. Cela risquerait de conduire à une perte de l'expertise collective, et également du savoir-faire instrumental, dans la mesure où, pour publier rapidement, il vaut souvent mieux acheter des appareils existants que de développer des instruments innovants. Par ailleurs, la diminution du taux de succès des projets ANR conduit à augmenter le temps passé à rédiger ou à évaluer les différents projets. On est aussi en droit de s'interroger sur l'apport réel de l'AERES à l'évaluation des unités rattachées au CNRS. Le sentiment qui se dégage dans le périmètre scientifique de la section est plutôt celui d'un appauvrissement global de l'évaluation des unités, engendré notamment par l'absence d'élus C et de représentants des sections secondaires dans les comités de visite. Il conviendrait d'évaluer l'efficacité globale du nouveau dispositif (ANR et AERES) pour les performances et la réactivité de la recherche nationale. En tout état de cause, il est important de maintenir un niveau de financement conséquent, sans fléchage a priori, des ANR blanches.

Dans le futur, il sera essentiel de préserver les différentes expertises scientifiques au sein du paysage national, comme les capacités à prendre des risques au niveau collectif et à développer des nouveaux axes originaux de recherche. La nouvelle autonomie des Universités et la possible compétition interuniversitaire en résultant sera-t-elle un facteur positif ou négatif de ce point de vue ? En l'absence de réponse évidente, le CNRS, qui a démontré ses capacités à organiser la diversité et la cohérence de la recherche au niveau national, et parfois local, doit rester au cœur du dispositif national de recherche. Ceci suppose un solide budget récurrent, permettant de financer des opérations à long terme dans les UMR comme dans les UPR, et des moyens de recrutement à la hauteur de ses missions.

Au sein du CNRS, les sections dépendant de l'INP, et en particulier la section 6, sont impliquées dans nombre de collaborations trans-instituts. Il faudra prendre garde à ce que ces activités aux interfaces ne soient pas handicapées par la nouvelle organisation. Les laboratoires évoluent également, dans le sens de regroupements au sein d'instituts élargis. Si ces regroupements ont des avantages indéniables lorsqu'ils sont pertinents, ils risquent de conduire mécaniquement à une disparition des activités «

minoritaires » par rapport aux axes fédérateurs. Là aussi, le CNRS a un rôle structurant à jouer.

Une recherche performante repose sur des moyens humains de qualité travaillant dans de bonnes conditions. Nous souscrivons de ce point de vue aux recommandations de la section 2, en y ajoutant un point spécifique, celui du potentiel technique des laboratoires. Si la sous-traitance permet dans une certaine mesure de réduire les besoins en niveaux T et AI, dans nombre de domaines, l'expérience montre tout l'apport des personnels à ce niveau de qualification, aussi bien pour la souplesse et la réactivité que pour la pérennité de l'expertise technique. Il nous semble important que cet apport soit mieux reconnu dans les carrières qu'il ne l'est actuellement.