

MATIÈRE CONDENSÉE : STRUCTURES ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES

Dominique BERTRAND
Président

Hélène Bouchiat
Thierry Bretnon
Jean-Michel Desvignes
Karine Dumesnil
Véronique Dupuis
Denis Feinberg
Jean-Pierre Fitoussi
Yves Guldner
Françoise Hippert
Jérôme Lesueur
Isabelle Mirebeau
Bernard Pannetier
Didier Poilblanc
Jean-Louis Porteseil
Xavier Quelin
Emmanuel Rosencher
Michèle Sauvage
Christophe Testelin

1 – SEMICONDUCTEURS

Dans le domaine des semiconducteurs, les dernières années ont été marquées par un effort soutenu dans la croissance et la maîtrise de nouveaux matériaux à fortes potentialités technologiques (semiconducteurs à large bande interdite, composés à base de nitrure de type GaInNAs, semiconducteurs ferromagnétiques). Dans le même temps, toute une ingénierie s'appuyant sur le progrès des techniques de fabrication et les connaissances acquises sur les propriétés fondamentales des semiconducteurs s'est développée et a acquis en maturité : réalisation de microcavités, cristaux photoniques, émetteurs à un photon, lasers à boîtes quantiques etc.

La dernière décennie a confirmé l'intérêt des structures à confinement quantique. Cet axe de recherche doit son dynamisme conjointement à l'étude des propriétés optique et électronique (nanoscience) et aux progrès dans la réduction des échelles (nanotechnologie). Ce domaine est riche tant en physique fondamentale (transport à un électron dans des boîtes quantiques, effet Hall quantique, etc.) qu'en physique appliquée (microcapteurs, composants opto-électroniques, etc.).

La course à l'intégration en micro-électronique à base de silicium, motivée par des raisons économiques, doit atteindre ses limites

au cours de la prochaine décennie, d'après la loi de Moore. Pour franchir ce mur technologique et financier (coût trop élevé des unités de production), une révolution technologique (intégration 3D par exemple) paraît nécessaire dans un futur proche. Depuis quelques années, des solutions alternatives à la microélectronique silicium sont apparues. Citons par exemple l'émergence du concept de calcul et d'ordinateur quantiques, qui mobilise un nombre important de communautés en raison des nombreuses options proposées. Les résultats les plus significatifs n'ont pas été obtenus en physique de la matière condensée. Cependant, le développement des nanotechnologies pour les matériaux semiconducteurs en fait l'un des axes majeurs de cette thématique en vue de dispositifs fonctionnels. On peut également citer les recherches en électronique moléculaire, dans le domaine des nanotubes, etc.

Deux familles de composés suscitent un vif intérêt. En premier lieu, les semiconducteurs à large bande interdite (GaN, AlN, SiC, ZnO, Diamant) font l'objet d'études depuis plusieurs années, dans un contexte international très compétitif. Les applications potentielles sont nombreuses : sources lasers dans le bleu ou l'UV, sources de lumière blanche, microélectronique en milieu hostile, détecteurs UV, électronique de puissance. On notera que la communauté nationale est structurée depuis cinq ans par un Groupement de Recherche. L'étude des composés nitrure semble la mieux avancée avec la réalisation de lasers émettant dans le bleu. Dans les composés à large bande interdite, la luminescence entre niveaux confinés de conduction (transitions intrabandes) a été observée dans l'infrarouge proche ce qui permet d'envisager la réalisation de diodes unipolaires émettant dans l'infrarouge jusqu'aux longueurs d'onde des télécommunications. Les structures à base de GaN donnant accès à tout le spectre visible, il est également envisagé de remplacer les ampoules électriques par des batteries d'émetteurs à base de nitrures et de disposer de sources solides d'éclairage. Cependant, de nombreuses questions fondamentales restent à résoudre. Ces problèmes nécessitent des recherches

poussées dans le domaine de l'hétéroépitaxie (y compris les croissances épitaxiales latérales telles que l'ELO) ainsi que dans celui de la physique des défauts et de la croissance de monocristaux. D'autres axes de recherches doivent être suivis tels que le dopage ou le codopage, la passivation par hydrogénation, la croissance par épitaxie et l'obtention d'interfaces de qualités.

La famille des nitrures à faible bande interdite (typiquement GaInNAs) fait l'objet d'une grande attention depuis peu. La réalisation d'alliages quaternaires nitrure permet de réduire la largeur de bande tout en maintenant un paramètre de maille constant grâce à l'incorporation d'antimoine ou indium. Ces composés doivent permettre de réaliser des lasers plus compétitifs sur substrat GaAs que les lasers commerciaux à base d'InP. Des problèmes de physique fondamentale très intéressants, liés à la répartition non aléatoire de l'azote (paires, triplets, amas) existent dans ces matériaux.

Les études en vue de source laser performante s'appuient sur les composés nouveaux cités précédemment mais également sur des composés III-V classiques. L'utilisation de composés à base d'antimoniure ou la réalisation de lasers et détecteurs à cascade quantique doivent permettre de réaliser des sources et détecteurs fonctionnant dans l'infrarouge moyen.

Par ailleurs, grâce au concept d'ingénierie de bande, on a assisté à l'émergence de nombreux dispositifs photoniques : microcavités, cristaux photoniques. L'intégration de certains de ces composants dans des dispositifs optoélectroniques a permis des avancées techniques remarquables (diode électroluminescente à cavité verticale). Cette ingénierie de bande permet aussi de développer des nouveaux matériaux pour l'optique non linéaire.

L'étude de la cohérence des états électroniques ou du spin dans les nanostructures s'est nettement développée au cours des dernières années, motivée par l'information et le calcul quantique ainsi que l'électronique de spin. L'étude des polaritons connaît également un important essor grâce à ces structures photo-

niques (microcavités). Des études fondamentales sur le caractère bosonique de ces particules, sur la dynamique non linéaire et la cohérence doivent être poursuivies, confortées par les avancées récentes.

Dans la recherche de bits quantiques (systèmes quantique à deux niveaux), les boîtes quantiques sont généralement considérées comme les systèmes les plus prometteurs. Comme indiqué précédemment, les avancées les plus spectaculaires ne concernent pas les nanostructures semiconductrices, mais il semble admis que la réalisation de dispositifs intégrés ne pourra se faire qu'en matière condensée. Cependant, le concept de bit quantique doit être validé dans ces systèmes, car bien que communément comparé à un atome artificiel, les boîtes quantiques sont fortement dépendante de leur milieu à l'inverse de l'atome en milieu dilué (problèmes de décohérence).

Parmi les composés innovants, les semiconducteurs magnétiques ont une place importante. D'abord observé dans les composés II-VI, le ferromagnétisme a été mis en évidence dans GaMnAs avec des températures de Curie proche de 100 K. Un ferromagnétisme à température ambiante a été prédit dans GaMnN et ZnO dopé (Mn, Cr). La maîtrise de ces matériaux est importante car elle permettrait de développer l'électronique de spin dans des systèmes entièrement semiconducteurs et de réaliser des dispositifs optoélectroniques à injection de spin polarisés. Un rapprochement entre les communautés des semiconducteurs et du magnétisme est en cours, en particulier dans le cadre d'un nouveau Groupement de Recherche.

L'intérêt de la communauté pour les boîtes quantiques reste à un niveau élevé. Ceci est dû à la croissance de nouveaux matériaux, tels que des boîtes GaN sur AlN, ce qui nécessite de nombreuses études fondamentales, en particulier en croissance épitaxiale auto-organisée aussi bien en EJM qu'en EPVOM. Pour les composés plus connus (typiquement InAs/GaAs), l'intérêt pour les boîtes portent à la fois sur la réalisation de bits quantiques, la fabrication de laser à boîtes quantiques ou d'émetteur à un photon. Ces émetteurs à un

photon permettront de disposer de sources utilisables en cryptographie quantique. Il est à noter que l'étude des propriétés fondamentales de ces structures a été rendue possible grâce au développement de techniques (microphotoluminescence, microscopie tunnel etc.) donnant accès à une nanostructure unique, ce qui a permis de s'affranchir des effets statistiques pour étudier des nano-objets individuels.

Les besoins en composants hyperfréquence se développent rapidement, les applications étant variées (téléphonie mobile, radar, etc.). Ceci nécessite d'améliorer la croissance des hétérostructures, en particulier la croissance métamorphique qui doit permettre de réduire les contraintes et les défauts. Des recherches doivent également être menées sur les matériaux utilisés pour les composants de puissance, tels que SiC et GaN.

Dans la filière silicium, l'amélioration des composants passe par l'étude de nouveaux matériaux diélectriques très minces pour le contrôle de grille et de leur qualité d'interface. On voit également apparaître des mémoires électriques à un ou plusieurs électrons. De nombreuses études fondamentales restent à faire dans l'élaboration et les propriétés électroniques de ces mémoires.

Par ailleurs, de nouvelles générations de semiconducteurs ont suscité un intérêt croissant ces dernières années :

- les nanotubes de carbone dont la fabrication est de mieux en mieux contrôlée et qui présentent des propriétés physiques très originales ;

- les semiconducteurs organiques dont les propriétés électroniques encore mal comprises sont fondamentales pour leur utilisation en optoélectronique.

La communauté des semiconducteurs dispose désormais de cinq centrales technologiques concentrant une grande partie des moyens de production en nanostructures semiconductrices au niveau national. Ces centres doivent permettre de rester compétitif au niveau international. L'accès à ces centres, l'irrigation et

les collaborations avec le reste de la communauté sont essentiels au bon développement de la recherche sur la territoire national.

INTERDISCIPLINARITÉ

La physique des semiconducteurs se situe à l'interface avec d'autres disciplines. Quelques exemples peuvent être donnés (liste non exhaustive) :

– avec la physique théorique : fermions fortement corrélés (effet Hall quantique, cage de Aharonov-Bohm), blocage de Coulomb, « Coulomb drag », interférences quantiques, phénomènes de cohérence et décohérence ;

– avec les recherches en systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS). Les MEMS et les dispositifs microfluidiques (microcanaux, micropompes, microvalves) bénéficient des technologies mises au point pour les microstructures semiconductrices ;

– avec la chimie : réalisation de nanocristaux et nanostructures par chimie douce, polymères semiconducteurs ;

– avec la biologie : utilisation de nanocristaux luminescents comme marqueurs biologiques, réalisation de puces à ADN à base de transistors à effet de champ ;

– avec les STIC : les dispositifs de traitement, stockage et transport de l'information bénéficient directement des recherches fondamentales en physique des semiconducteurs.

2 – MAGNÉTISME

2.1 INTRODUCTION

L'explosion de la nanophysique a conduit à la disparition des frontières qui existaient naguère entre magnétisme, physique des semi-conducteurs et supraconductivité et à

la prise en compte d'échelles de longueur multiples pour résoudre le lien structure- propriétés, clé pour concevoir et fabriquer de nouveaux matériaux et de nouveaux dispositifs.

Les dimensions de plus en plus faibles des objets magnétiques permettent d'accéder aux mécanismes élémentaires et leur assemblage permettra de construire des systèmes fonctionnalisés bien définis. À ces dimensions, les effets quantiques peuvent devenir prédominants, conduisant à de nouveaux concepts d'applications. Le développement du nanomagnétisme a nécessité le développement de techniques d'élaboration (avec par exemple la mise en place de centrales de nanofabrication), de caractérisation et de simulation de plus en plus sophistiquées.

Des études fondamentales ou applicatives sont poursuivies sur des systèmes magnétiques plus classiques pour créer ou optimiser des matériaux ou des méthodes d'élaboration.

2.2 MAGNÉTISME DES SYSTÈMES NANO ET MÉSCOPHIQUES ET DES STRUCTURES ARTIFICIELLES

C'est un domaine pluridisciplinaire dans lequel la communauté française, très active, est bien structurée, grâce en particulier à l'action de GDR.

Les multicouches et superréseaux magnétiques

Les systèmes artificiels utilisant le dépôt de **films minces plans et continus** sont encore très étudiés dans le but de réaliser des interfaces idéales dans des conditions parfaitement contrôlées car le rôle de ces interfaces est primordial pour le comportement magnétique. Les systèmes associent maintenant des couples de matériaux très différents (métal, isolant, semi-conducteur, supraconducteur) en vue

d'obtenir des dispositifs à propriétés magnétiques ajustables. Les multicouches peuvent être post-structurées en circuit, plots ou lignes par diverses techniques de lithographie de résolution submicronique. L'effort s'est poursuivi sur la maîtrise de la croissance de l'hétéroépitaxie d'oxydes. En liaison avec la physique quantique mésoscopique sont étudiés les effets de proximité et de cohérence électronique à l'interface ferromagnétique/supraconducteur. À côté des films continus post-nanostructurés, la nanostructuration directe est étudiée par croissance de films de type 3D par épitaxie sur des surfaces monocristallines, vicinales ou reconstruites et/ou par dépôt 2D de films ultraminces discontinus.

Les plots et agrégats

La taille des nanoparticules magnétiques étudiées s'étale depuis quelques dizaines de nanomètres dans des plots présentant un comportement classique, jusqu'à quelques atomes dans les aimants moléculaires à caractère purement quantique (macrocristal à base de Fe_8 , Mn_{12} , etc. préparé par voie chimique). Dans les premiers systèmes, est étudiée la dynamique de création et d'annihilation des défauts topologiques (vortex et parois de domaine). À l'échelle intermédiaire, le retournement de l'aimantation d'un agrégat unique de cobalt de 3 nm de diamètre (environ 1 000 atomes) a été caractérisé par la technique micro-SQUID. Le phénomène de super-paramagnétisme, qui limite la taille des agrégats magnétiques dans des dispositifs, pourrait être surmonté par l'utilisation de matériaux à forte anisotropie magnétique. Au niveau fondamental, la quantification du moment magnétique d'un agrégat unique contenant une centaine d'atomes vient d'être observée. *Les comportements dynamiques fondamentaux sont de plus en plus étudiés sur ces nano-objets, car leur temps caractéristique est de l'ordre de la nanoseconde, ce qui correspond aux temps d'écriture recherchés pour les applications.*

2.3 ÉLECTRONIQUE DE SPIN ET MAGNÉTOTRANSPORT

L'électronique de spin est basée, non sur la charge, mais sur le spin des électrons. Les études concernent la dépendance en spin du transport électronique dans les nanostructures magnétiques.

La magnétorésistance géante (GMR) des multicouches magnétiques métalliques (couches ferromagnétiques séparées par une couche non magnétique) a déjà des applications dans les têtes de lectures pour disques durs et les capteurs. Les études concernent maintenant la GMR perpendiculaire des multicouches et des nanofils ainsi que le retournement d'aimantation par injection de courant polarisé en spin.

Actuellement, le sujet le plus étudié est la magnétorésistance tunnel (TMR) des jonctions tunnel magnétiques (JTM), constituées de deux couches ferromagnétiques de coercitivités magnétiques différentes, séparées par une fine couche isolante. Des électrons, polarisés au passage des électrodes magnétiques, peuvent traverser la barrière isolante par effet tunnel et cette transmission tunnel, qui dépend de l'orientation relative des aimantations des deux électrodes aux interfaces avec la barrière tunnel et de la nature de la barrière, conduit à la magnéto-résistance tunnel (TMR).

L'intérêt porté à ces phénomènes de transport dépendant du spin est fortement motivé par les applications industrielles : le transistor de spin, le stockage de l'information (mémoires non volatiles de très haute densité) et différents capteurs de champ magnétique. Mais les jonctions tunnel ont également un intérêt fondamental grâce à la grande sensibilité du transport tunnel polarisé en spin au magnétisme local des électrodes (analyse de la structure en domaines magnétiques des couches minces ou du mécanisme de polarisation en spin de l'effet tunnel).

Les efforts actuels se poursuivent dans deux directions principales : premièrement

approfondir les connaissances et technologies basées sur la GMR et la TMR, en développant de nouveaux matériaux présentant des polarisations de spin élevées (demi-métaux) ou en améliorant la filtration de spin dans les dispositifs existants, deuxièmement explorer de nouvelles voies pour générer et utiliser des courants polarisés en spin. Divers dispositifs à injection et accumulation de spin sont ainsi en cours de développement (transistor basé sur l'injection de spin dans un semi-conducteur, transistor à un électron, etc.). Ceci inclut l'étude du transport polarisé en spin dans les semiconducteurs. L'adjonction de propriétés magnétiques à des semiconducteurs classiques permettrait d'intégrer l'électronique de spin à la microélectronique. Parallèlement, le développement de semiconducteurs ferromagnétiques à température ambiante permettrait de réaliser des dispositifs combinant électronique conventionnelle et électronique de spin.

Des études visent aussi à combiner l'effet tunnel dépendant du spin et le blocage de Coulomb pour le contrôle magnétique de dispositifs ultimes type transistor à un électron.

2.4 SIMULATION ET MODÉLISATION

La simulation numérique ne cesse de progresser vers une meilleure prise en compte de la complexité des objets traités. La validité des calculs micromagnétiques actuels est telle que les études expérimentales de petits objets magnétiques sont comparées à des calculs micromagnétiques qui fournissent la distribution d'aimantation à des échelles bien supérieures aux tailles atomiques. *Un développement récent, obtenu par des équipes françaises, a consisté à calculer à partir des configurations d'équilibre leur spectre d'excitations, qui peut directement être comparée aux mesures de susceptibilité linéaire.*

Une frontière de la modélisation à l'heure actuelle se situe au niveau de la prise en compte des fluctuations thermiques, qui ne peuvent plus être négligées pour des nanostructures,

dans lesquelles le mouvement brownien devient prépondérant. L'électronique de spin, qui prévoit à des tailles nanométriques une interaction directe entre courant polarisé en spin et aimantation, constitue un autre sujet très actif. Les enjeux ici se situent plutôt dans les équations exactes décrivant cette physique. Enfin, un objectif est de réussir à bâtir des codes hybrides associant calculs *ab initio* pour les tailles atomiques et micromagnétisme aux échelles supérieures.

2.5 DYNAMIQUE D'AIMANTATION

La dynamique de l'aimantation, sur toute la gamme des fréquences, constitue depuis quelques années un sujet extrêmement actif. Vers les très basses fréquences, l'étude des mouvements de parois en milieu aléatoire a permis une mise en évidence expérimentale de lois de reptation d'objets élastiques désordonnés. Aux hautes fréquences (GHz), où le phénomène important est la précession de l'aimantation autour du champ appliqué, des vérifications expérimentales de ce comportement sur des objets magnétiques microniques ont été obtenues. L'utilisation de lasers femtoseconde en configuration pompe-sonde ouvre un nouveau champ de recherche, dans lequel différents systèmes se retrouvent mêlés : la répartition en énergie des électrons près du niveau de Fermi, le mouvement des atomes, et l'ordre magnétique local. Ces expériences préfigurent probablement une « grande unification » dans la description du magnétisme et de la structure atomique et électronique. Enfin, le problème du contrôle de l'amortissement en dynamique de l'aimantation pourrait être résolu grâce au développement des techniques de fabrication et de caractérisation des nano-objets.

2.6 MAGNÉTISME MOLÉCULAIRE

La communauté française du magnétisme moléculaire est pluridisciplinaire et ses activités sont diversifiées : synthèse organique

et inorganique, auto-assemblage, propriétés magnétiques (statiques, dynamiques et photo-induites), magnéto-optiques, propriétés d'optique non-linéaire, effets magnéto-chiraux, magnéto-transport... Les principales directions de recherche sont : molécules à grand spin, réseaux ferro- ou ferrimagnétiques à base organique, magnétisme photo-commandé et/ou matériaux poly-fonctionnels. Les perspectives actuelles restent principalement du domaine fondamental : recherche d'architectures permettant d'élever la valeur du spin dans l'état moléculaire fondamental, d'élever la température d'ordre magnétique, ou de réunir les conditions d'une poly-fonctionnalité.

L'évolution vers les nanosciences se fait principalement dans l'approche « bottom-up » (synthèse d'entités moléculaires de plus en plus grosses), mais les premiers indices d'une approche inverse sont visibles : préparation de couches minces ou élaboration par nanolithographie de nano-objets magnétiques à base moléculaire.

2.9 MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES À PROPRIÉTÉS SPÉCIFIQUES POUR APPLICATIONS

L'évolution des matériaux doux pour l'électronique et l'électrotechnique reste fortement conditionnée par l'accroissement des fréquences de travail : couches minces pour hyperfréquences, rubans trempés, tôles fer-silicium d'épaisseurs réduites. Pour ces dernières l'effort des métallurgistes porte également sur les textures cubiques planaires pour utilisation dans les machines tournantes. Les aspects fondamentaux concerneront en particulier la description des pertes en régime dynamique et non sinusoïdal, la compréhension et le contrôle des effets magnétoélastiques.

Du côté des aimants hautes performances et matériaux magnétostrictifs, des avancées sont prévisibles dans les matériaux "doux-durs" nanostructurés à une échelle inférieure à la

longueur d'échange (couplage d'échange entre grains). L'effort porte à la fois sur des procédés originaux d'élaboration et les modélisations numériques. Dans les aimants hexaferrites, de nouvelles substitutions ont permis d'augmenter significativement le champ coercitif.

2.8 PROGRÈS PHYSIQUES ET TECHNIQUES EN CONDITIONS EXTRÊMES

Des progrès instrumentaux significatifs réalisés ces dernières années permettent actuellement d'effectuer des mesures microscopiques en conditions extrêmes, souvent sur des très grands instruments. On peut citer les mesures de diffractions de rayons X ou de neutrons sous très haute pression, la RMN en champ intense, les mesures laser de type pompe-sonde etc.

3 – FERMIONS FORTEMENT CORRELÉS, ET SUPRACONDUCTIVITÉ NON-CONVENTIONNELLE

Ce domaine connaît actuellement des avancées spectaculaires : les grandes classes d'états électroniques (magnétiques, supraconducteur) se trouvent profondément renouvelées, et ceci pour plusieurs raisons. L'une d'elles est la très grande variété et la qualité structurale des composés, classiques ou totalement nouveaux, que les chimistes synthétisent, en étroite collaboration avec les physiciens. Cette collaboration est soutenue par le GDR « Oxydes à propriétés remarquables ». La variation systématique de la concentration électronique ou de paramètres extérieurs (pression, champ magnétique) révèle, surtout dans les oxydes, des diagrammes de phase extrêmement riches.

Ceci permet de tester une variété de nouveaux concepts introduits ces dernières années, et en grande partie stimulés par les supraconducteurs à haute température critique. L'étude des excitations élémentaires (spin, réseau, orbite électroniques) implique des moyens spectroscopiques sans cesse raffinés. La compétition entre différents types de mises en ordre, le lien entre magnétisme et supraconductivité, le rôle de la basse dimensionnalité sont mieux compris mais apportent en permanence de nouvelles surprises. Enfin, le contrôle des transitions à l'aide de paramètres extérieurs laisse prévoir des applications originales.

3.1 TRANSITION ISOLANT-MÉTAL

La compréhension de la transition de Mott-Hubbard a franchi un cap important grâce à un nouvel outil théorique (champ moyen dynamique), et grâce à des méthodes numériques poussées. Ces avancées ont permis d'élucider certaines signatures spectroscopiques (pic de quasiparticules et pseudo-gap) dans des oxydes de structure tridimensionnelle. Par ailleurs, une séparation de phase intrinsèque, due à des interactions antagonistes, apparaît dans de nombreux systèmes. Ces textures (rubans ou « stripes ») sont un sujet d'étude très actif, et mettent en jeu aussi bien les déformations de réseau que les interactions coulombiennes à longue portée. Dans ce domaine, les spectroscopies de haute énergie avec rayonnement synchrotron, la diffraction de neutrons ainsi que la microscopie électronique à haute résolution, sont des outils de la plus haute importance.

3.2 MAGNETISME QUANTIQUE ET SYSTÈMES FRUSTRÉS

Dans les réseaux magnétiques géométriquement frustrés, de nouveaux types de désordre magnétique, tels que liquides, glaces

ou verres de spin, ainsi nommés d'après leurs analogies avec les phases chimiques, ont pu être observés dans des matériaux chimiquement ordonnés. Les glaces de spin présentent le premier cas connu de frustration d'interactions ferromagnétiques. Les liquides de spins, dans lesquels les moments fluctuent jusqu'à des températures proches du zéro absolu, ont suscité un intense effort expérimental et théorique. De tels états ont été observés non seulement dans des systèmes magnétiques classiques (oxydes, composés moléculaires), mais aussi dans l'hélium 3. Dans les liquides de spin, la forte frustration qui empêche la stabilisation d'un ordre magnétique à longue portée, ouvre la possibilité d'observer de nouveaux états fondamentaux purement quantiques, analogues à ceux prédits pour les supraconducteurs à électrons corrélés (état RVB).

L'investigation des états « liquides de spin » se fait par des méthodes expérimentales variées telles que susceptibilité, chaleur spécifique, diffraction de neutrons, RPE, RMN, spectroscopie Mössbauer, muons. De forts champs magnétiques fournissent une sonde des états excités de ces systèmes. En particulier, des plateaux d'aimantation sont souvent observés, traduisant le rétablissement de certains types d'ordres magnétiques. Récemment la RMN en champ intense (28 T) a permis l'observation d'un nouveau type d'ordre dans un liquide de spin. Par ailleurs, la pression permet aussi d'explorer ces nouveaux états.

Dans certains matériaux comme des systèmes de dimères en interaction, le champ magnétique peut induire une transition de phase quantique avec une mise en ordre transverse au champ magnétique. Ce phénomène spectaculaire est décrit d'un point de vue théorique comme une condensation de Bose de triplets/magnons.

3.3 DÉGÉNÉRESCENCE ET MISE EN ORDRE ORBITALE

Le degré de liberté orbital est récemment apparu comme très important dans les

oxydes de métaux de transition et matériaux apparentés. Le phénomène de mise en ordre orbitale, et le couplage étroit entre ordre orbital et ordre magnétique est connu depuis longtemps. La re-découverte et l'étude extrêmement poussée des manganites a complètement relancé le sujet, avec la découverte du phénomène de magnétorésistance colossale. L'exploration complète du diagramme de phases de ces systèmes, tridimensionnels ou en feuillets, n'est pas achevée. Elle révèle déjà une compétition étroite entre phases isolantes antiferromagnétiques avec ordre de charge et ordre orbital, et phase métallique ferromagnétique. La séparation de phases, souvent observée, réagit à plusieurs paramètres extérieurs. Les études sur composés en couches minces ou polycristallins, le rôle des joints de grain, la recherche de magnétorésistance à température ambiante ont un très fort intérêt technologique. Plus récemment, le concept de liquide orbital fournit un nouvel exemple de liquide quantique.

3.4 BASSE DIMENSIONNALITÉ

Les systèmes unidimensionnels sont mieux compris sur le plan théorique (liquide de Luttinger) et trouvent de nouvelles réalisations expérimentales (nanotubes de carbone, fils quantiques). La physique en deux dimensions reste extrêmement riche et encore mal décrite sur le plan théorique. Le passage de une à deux dimensions oblige à examiner finement les excitations de basse énergie, clé d'un retour éventuel vers le liquide de Fermi. À côté des matériaux organiques, de nouveaux objets d'études sont fournis par les hétérostructures à base de semiconducteurs. D'autres systèmes comme les échelles de spin éclairent le lien entre antiferromagnétisme et supraconductivité, exacerbé par la basse dimensionnalité. Le rôle des degrés de liberté de réseau, bien connu dans les systèmes à ondes de densité de charge et de spin, ne peut évidemment être oublié. La compréhension des phases électroniques « glissantes » (ondes de densité de charge ou de

spin) bénéficie du rayonnement synchrotron, et certains résultats remettent en question l'hypothèse habituelle de faible couplage au réseau. Ce dernier, joint à la présence de fortes corrélations, donne également lieu à une grande variété de comportements comme dans les organiques et les systèmes « spin-Peierls ».

3.5 SUPRACONDUCTEURS ET SUPRAFLUIDES

Les recherches sur la supraconductivité enregistrent de progrès spectaculaires, réalisés en grande part grâce aux efforts consentis ces dernières années dans l'étude des cuprates à haute température critique.

La synthèse chimique produit de nouvelles phases de composés ternaires, quaternaires et au-delà, mais aussi des monocristaux de haute qualité, indispensables aux études fondamentales, ainsi que des couches minces et multicouches d'orientations contrôlées.

Le développement des techniques expérimentales, particulièrement les spectroscopies de haute énergie, infrarouges, sondes locales (RMN), diffraction et diffusion inélastique des neutrons, transport de chaleur, pour n'en citer que quelques-unes. Les techniques de champ proche (STM, contact à pointe, AFM) jouent un rôle de plus en plus important comme sondes de surface, aux échelles nanométriques.

La compréhension théorique qui relie le phénomène de la supraconductivité aux corrélations électroniques et au magnétisme de basse dimensionnalité. Le lien entre supraconductivité et transition isolant-métal est l'une des grandes révolutions conceptuelles du domaine, et ouvre la voie à de nouveaux matériaux, peut-être à températures encore plus élevées.

La quête de nouveaux matériaux supraconducteurs a été relancée par la découverte du composé binaire MgB_2 . Outre sa température critique élevée ($T_c = 39\text{K}$), un faisceau

convergent de mesures (spectroscopie tunnel, photoémission, chaleur spécifique) indique la présence d'un double gap, ce qui est une propriété tout à fait nouvelle. Ce matériau est par ailleurs d'un grand intérêt technologique de par sa mise en forme relativement aisée.

Du côté des cuprates supraconducteurs, des progrès importants ont été enregistrés quant à la symétrie du paramètre d'ordre : des mesures de spectroscopie d'Andreev sur des faces cristallines bien identifiées révèlent la présence d'états de surface dans le gap, qui sont une signature d'une importante composante « d » du paramètre d'ordre. Par ailleurs, la spectroscopie tunnel à balayage a permis de démontrer une inhomogénéité intrinsèque du gap à l'échelle nanométrique. La clé du mécanisme microscopique réside dans la compréhension du pseudo-gap, pour lequel des informations de première importance ont été obtenues, notamment en spectroscopie infrarouge. Le transport de la chaleur par les quasiparticules permet de tester un comportement de non-liquide de Fermi. La relation entre la supraconductivité et l'antiferromagnétisme de la phase stoechiométrique isolante a été clarifiée par l'étude des impuretés par RMN. L'attention se porte actuellement sur la nature des vortex induits sous champ magnétique, comme « révélateurs » d'un état antiferromagnétique avec pseudo-gap. Enfin, l'investigation des rubans ou « stripes » se poursuit, sans que leur universalité ait encore été démontrée. De manière plus fondamentale, un lien a été suggéré entre la supraconductivité et l'existence d'un « point critique quantique » à $T = 0$ et en fonction du dopage. Par ailleurs, les interactions coulombiennes à longue portée semblent essentielles, au moins pour comprendre la transition isolant-supraconducteur dans ces systèmes. La profondeur et la variété des problèmes conceptuels posés par ces matériaux justifie amplement l'intérêt qu'ils continuent à susciter, et l'un des grands défis est de comprendre l'origine du pseudo-gap : est-il dû à des fluctuations antiferromagnétiques réminiscentes de la phase isolante, ou bien à un effet précurseur à la supraconductivité, comme semblent l'indiquer certaines mesures récentes ? Dans d'autres familles de composés, le lien entre

transition isolant-métal, magnétisme de basse dimensionnalité et supraconductivité est établi dans les échelles de spin dopées. Les supraconducteurs organiques restent un banc d'essai pour la compétition entre supraconductivité et d'autres instabilités électroniques. D'autres perspectives concernent la transition isolant-métal en présence de dégénérescence orbitale.

Une supraconductivité plus « exotique », mais à basse température, apparaît dans des oxydes, composés de terres rares ou organiques. Comme problèmes très actuels on citera : la nature du paramètre d'ordre dans les ruthénates (d , ou bien p , ce qui serait une première dans un cristal) ; le diagramme de phases sous champ magnétique dans les composés à fermions lourds UPt_3 , UBe_{13} , dont les transitions examinées par la diffraction de neutrons révèlent la symétrie complexe du paramètre d'ordre ; la supraconductivité réentrante, récemment découverte, obtenue sous champ dans un matériau ferromagnétique, relance spectaculairement le problème de la relation entre ces paramètres d'ordre a priori antagonistes.

Hormis ces aspects microscopiques, la physique de l'état mixte (vortex) dans les cuprates mais aussi d'autres matériaux à plus basse T_c ou plus « classiques » (bismuthates, $NbSe_2$, etc.) est d'une très grande richesse : le diagramme de phases sous champ comprenant les phases solide et liquide de vortex est maintenant assez bien compris. La phase solide, en fonction du désordre et de la dimensionnalité, peut être déformée élastiquement (« verre de Bragg », prédit théoriquement et observé aux neutrons) ou topologiquement (verre de vortex). La visualisation des vortex permet désormais l'étude fine de leur structure : transition de fusion du solide de vortex, phases exotiques différentes du réseau d'Abrikosov, mais aussi de leur dynamique (pénétration du flux, ancrage par des défauts contrôlés comme les traces d'irradiation). La phénoménologie du glissement des vortex fournit des analogies profondes avec d'autres problèmes comme le glissement des ondes de densité de charge ou le frottement solide, où entrent en compétition rigidité et désordre. Dans les grands problèmes en suspens, il faut citer le « liquide » de vortex dont la nature est encore obscure.

Dans le domaine des superfluides, on soulignera tout particulièrement les expériences de trempe du paramètre d'ordre dans l'Hélium 3 superfluide. Ce processus génère des régions de paramètre d'ordres différents connectées par des vortex. Leur mise en évidence par des techniques de bolométrie extrêmement élaborées fournit un modèle de laboratoire pour la cosmologie et les transitions de phases intervenues lors du refroidissement de l'Univers, dans lesquelles des défauts topologiques auraient été « gelés » lors des brisures de symétrie fondamentales successives. Par ailleurs, l' ^3He superfluide à ultra-basse température révèle des comportements quantiques cohérents extrêmement originaux (courants de spin). Mentionnons aussi la découverte récente d'une phase supersolide dans l'Hélium 4 qui a ravivé l'étude des modèles de bosons en interaction.

On ne peut manquer d'évoquer brièvement les applications des supraconducteurs. Dans le domaine des hautes puissances (lignes à fort courant), l'utilisation des supraconducteurs à haute température critique progresse du fait des enjeux gigantesques, malgré la difficulté de mise en forme de ces matériaux (rubans de Bi_{2212}). En dépit de sa T_c plus modeste, MgB_2 présente un fort intérêt technologique car il s'avère plus facile à maîtriser. L'électrotechnique bénéficie déjà de limiteurs de courant à base de supraconducteurs HTC. Par ailleurs, les dispositifs de faible puissance comme des magnétomètres à SQUID fonctionnent déjà, très compacts car refroidis à l'azote liquide au lieu de l'hélium. Il faut bien sûr citer aussi les filtres radiofréquences pour communications à large bande, avantageux par leur bas niveau de bruit.

Pour finir cette section, soulignons que les études actuelles sur des matériaux massifs et en couches minces, hormis leur intérêt propre (nouvelles phases, nouveaux concepts), sont également à la base des nanotechnologies de demain : l'utilisation dans de tels dispositifs de systèmes fortement corrélés donnera certainement lieu à des propriétés insoupçonnées, comme le montrent déjà l'exemple des nanotubes de carbone et du gaz d'électrons bidimensionnel.

3.6 NOUVEAUX OUTILS THÉORIQUES

Tous ces développements sont nourris de progrès remarquables sur le plan des outils théoriques. En dimension trois, la méthode de champ moyen dynamique DMFT, qui repose sur une idée simple mais très belle, permet une description exacte des fluctuations quantiques dans la limite de grande dimension d'espace. Les méthodes numériques (diagonalisations exactes, Monte Carlo quantique, groupe de renormalisation) permettent de beaucoup mieux connaître la physique dans le cas difficile de deux dimensions d'espace. À une dimension, des progrès spectaculaires ont été réalisés grâce à la méthode de groupe de renormalisation par la matrice densité DMRG permettant d'atteindre une précision sans précédent. Enfin, les méthodes ab-initio cherchent à incorporer les effets des corrélations (méthodes GW, DMFT + LDA), y compris dans la modélisation des spectroscopies de haute énergie.

4 – MÉSCOPIE

L'étude des phénomènes quantiquement cohérents à une échelle dite « **mésoscopique** », intermédiaire entre celle de l'atome et l'échelle macroscopique, a mené à la découverte de phénomènes fondamentaux liés à la cohérence de phase des fonctions d'onde électroniques et au très faible nombre de « canaux » de conductance en jeu. Plus que sur les matériaux eux-mêmes, les recherches portent sur les nouveaux concepts généraux liés à la réduction de la taille des systèmes physiques. Elles ont conduit à un effort théorique et expérimental sur plusieurs axes fondamentaux. Les études se font sur des objets submicroniques, presque toujours aux très basses températures, là où les longueurs de cohérence sont suffisamment grandes. Il est ainsi possible d'anticiper les propriétés à plus haute température d'objets beaucoup plus petits dont la technologie de fabrication n'est

pas encore maîtrisée. Les corrections quantiques aux mécanismes de **transport électronique** mettent en jeu les interférences électroniques et les propriétés du spectre des niveaux électroniques dans les systèmes de très petite taille. Il est possible d'agir sur la phase électronique grâce à l'effet Aharonov-Bohm en géométrie d'anneau. Les expériences sous champ magnétique ont été parmi les premières à révéler ces corrections : localisation faible, oscillations de la magnéto-résistance. L'existence de courants permanents dans un anneau non-supraconducteur présentant par ailleurs une résistance non nulle à un générateur de courant extérieur a été aussi montrée et constitue une signature directe de la cohérence de phase.

Ces phénomènes d'interférence quantiques prennent un caractère particulier dans les jonctions hybrides impliquant un supraconducteur. L'effet de proximité dont les premières études remontent aux années 60 a été « revisité » à la lumière des avancées de la physique mésoscopique. Un mécanisme subtil de réflexion cohérente au contact d'un supraconducteur – la réflexion d'Andreev avec transfert de paires de Cooper – est à l'origine de corrélations à très longue distance et de comportement paradoxaux comme la ré-entrance à très basse température. Les réflexions d'Andreev multiples entre deux réservoirs supraconducteurs donnent lieu à un couplage Josephson longue portée et au transfert de charges multiples observé dans des expériences de bruit de grenaille. L'interface entre un conducteur ferromagnétique et un métal supraconducteur, deux ordres antagonistes, peut être le siège de phénomènes spectaculaires comme le couplage Josephson π .

Bien que les phénomènes décrits ci-dessus soient très généraux et dépendent peu des matériaux – métaux nobles, semiconducteurs, quasicristaux, matériaux à ondes de densité de charge, etc – pourvu que la cohérence de phase soit réalisée, ils deviennent très marqués à mesure que le nombre de canaux de conduction devient plus faible.

Le fil quantique est le prototype de ces nouveaux types de conducteurs. Les techniques de nanolithographie associées à la croissance

d'hétérojonctions à base de semiconducteurs (GaAs-GaAlAs) ont fourni des structures de très haute mobilité. L'émergence de techniques « bottom-up » en permettant la fabrication de fils moléculaires très peu désordonnés comme les nanotubes de carbone est l'une des méthodes les plus prometteuses pour explorer les caractères spécifiques du transport quantique unidimensionnel. Ceux-ci se manifestent par une disparition de la loi d'Ohm et un comportement pathologique de la conductance avec la température ou la longueur. Le nanotube de carbone peut être mono ou multifeuillet, semiconducteur ou métallique. Un certain nombre d'études récentes dans les nanotubes métalliques montrent que le transport est quasi balistique et non dissipatif permettant des densités considérables de courant. Des expériences à Orsay ont montré la possibilité d'induire de la supraconductivité à très basse température. Des résultats similaires ont été obtenus également sur des chaînes d'ADN.

Il est aussi devenu possible de sonder le transport à travers un atome unique ceci aussi bien dans l'état normal que dans l'état supraconducteur. Les caractéristiques de transmission et les caractéristiques courant tension dans l'état supraconducteur ont pu être reliés au nombre et à la transparence de quelques canaux résiduels. Ces résultats témoignent du succès de la théorie quantique dans des situations ultimes parfaitement maîtrisées.

Le confinement, le désordre et les faibles densités électroniques en jeu confèrent un rôle prépondérant aux interactions coulombiennes. La compréhension du rôle des interactions est certainement l'un des problèmes les plus difficiles et les plus importants à résoudre de la physique de la matière condensée. Les questions soulevées par les systèmes nanoscopiques conduisent à considérer de nouveaux aspects du problème à N corps. Ces questions rencontrent souvent celles qui sont posées sur les fermions fortement corrélés dans le cas des matériaux à propriétés nouvelles. Dans le cas discuté ici la physique des corrélations est déterminée par la dimensionnalité des objets étudiés : gaz bidimensionnel d'électrons, fils ou boîtes

quantiques. La certitude qu'un gaz bidimensionnel ne pouvait être qu'isolant dans la limite des très basses températures a été remise en cause récemment par des expériences sur des MOSFETs montrant une transition métal isolant lorsque la densité électronique devient très faible.

Les interactions électroniques jouent aussi un rôle fondamental dans le transport électronique dans les fils quantiques dont l'état fondamental présente les caractéristiques d'un liquide de Luttinger. Une manière élégante d'atteindre cette limite du conducteur quantique unidimensionnel est d'étudier le transport d'un gaz électronique bidimensionnel sous très fort champ magnétique. En effet, dans ce régime d'effet Hall Quantique, les électrons sont confinés dans des états de bord où les électrons circulant dans des sens opposés sont spatialement séparés. Dans ce dernier régime, il a pu être montré que le courant électrique ne fait pas intervenir des électrons individuels mais des excitations collectives transportant une charge fractionnaire. Celles-ci ont été mises en évidence en mesurant le bruit de grenaille sensible à la mesure absolue de la charge des quasi-particules. Ces aspects font aussi l'objet d'un effort théorique considérable.

Qu'ils soient métalliques ou semi-conducteurs, les îlots de très petite taille (**boîtes quantiques**) couplés par effet tunnel présentent des phénomènes variés à l'échelle de la charge et du spin uniques. La physique du transistor mono-électron est maintenant bien comprise. À basse température dans des îlots assez petits, l'énergie électrostatique pour ajouter un électron est grande, le passage des électrons se fait un par un (blocage de Coulomb) et peut être cadencé par la polarisation d'une grille. Le remplissage des états quantiques de l'îlot peut ainsi être suivi électron par électron en particulier en présence de champ magnétique et permettre ainsi une véritable spectroscopie des niveaux (Cornell). L'exploration des spectres de systèmes aussi variés que les boîtes quantiques semi-conductrices, les nanoparticules magnétiques, ferromagnétiques ou supraconductrices est un domaine en pleine

activité. Par exemple que devient l'état supraconducteur lorsque la taille est si petite que le nombre de niveaux électroniques participant à la formation des paires de Cooper tend vers 0 ? La parité du nombre d'électrons et les corrélations jouent un rôle dans les propriétés supraconductrices ou magnétiques de nanograins. La transmission à travers un îlot montre un effet de résonance pour les remplissages impairs c'est-à-dire spin demi-entier. La forte analogie avec l'effet Kondo classique observé dans les métaux en présence d'impuretés magnétiques remet à l'ordre du jour l'étude de cet effet à l'échelle du spin unique ; ici, celui de l'électron dans l'îlot.

La cohérence quantique. Une question fondamentale posée par la miniaturisation est le passage d'une description classique à une description quantique d'objets ou de circuits. Il y a à l'heure actuelle un progrès sans précédent dans le développement de circuits électroniques quantiques. À titre d'exemple, un nanocircuit induction capacité n'est rien d'autre qu'un oscillateur harmonique quantique. Les études sur le retournement de l'aimantation de nanograins magnétiques (microsquad) ou les observations récentes des oscillations de Rabi dans les boîtes à paires de Cooper supraconductrices (qubit Josephson, Saclay) sont un pas prometteur pour le développement de briques de bases de calculateurs quantiques basés sur des circuits « solides » compatibles avec les technologies d'intégration de la microélectronique. Le chemin est encore long car il faut maîtriser des problèmes fondamentaux comme celui de la décohérence, mais quelques verrous ont été levés. Il faut noter un rapprochement significatif des communautés de l'optique quantique et de la matière condensée autour de ces problèmes pluridisciplinaires. Le problème très fondamental de la décohérence dans la limite de température nulle fait actuellement l'objet d'un débat passionné autant sur le plan théorique que sur le plan expérimental. La question est de savoir si le temps de cohérence de phase, par exemple celui extrait des expériences de localisation faible, sature ou diverge à très basse température. Cette question n'est pas encore tranchée.

La réalisation et l'étude de très petits objets pose la question de leur connexion au monde macroscopique extérieur (la **mesure**). Il y a des problèmes technologiques évidents de formation, maîtrise et modélisation des contacts mais également des questions fondamentales sur la mesure de systèmes quantiques. L'étude comparée de systèmes isolés ou connectés – courants permanents, polarisabilité, conductance ac – a montré la distinction fondamentale entre ces types de mesures et devrait permettre de mieux cerner les effets respectifs des degrés de liberté internes et externes des systèmes

étudiés. De nouvelles méthodes expérimentales comme les sondes locales à très haute sensibilité (microsquid, microscopes tunnel ou magnétique dédiés) ont beaucoup progressé depuis plusieurs années, la motivation étant d'explorer les propriétés spectrales d'objets uniques notamment aux températures les plus basses. D'autres méthodes comme les mesures de bruit, importantes pour sonder les corrélations temporelles ou les mesures dépendantes du temps devraient permettre d'aborder les problèmes de cohérence et d'interaction sous un angle nouveau.