

## Synthèse de carrière :

• **1989-1994.** Les premiers pavages non périodiques furent introduits par le mathématicien Roger Penrose en 1974 et ce n'est que dix ans plus tard qu'ils trouvèrent une réalisation physique dans certains alliages d'aluminium (AlMn, AlCuFe). Après une thèse consacrée à l'étude des propriétés électroniques de ces systèmes, dits quasicristallins (1989-1992, Laboratoire d'Etudes des Propriétés Electroniques du Solide, CNRS et Université J. Fourier (UJF) – Grenoble, sous la direction de Françoise Cyrot-Lackmann), j'ai effectué un **stage post - doctoral** au sein du groupe du Professeur O.G. Symko du Département de Physique de l'Université de l'Utah, Salt Lake City, USA (1992-1994). Ce stage comprenait deux volets. Le premier a consisté à étendre l'étude des propriétés physiques des quasicristaux (notamment grâce à la synthèse de couches minces) et le second, plus appliqué, consistait lui au développement de systèmes de réfrigération thermo - acoustiques. Ces deux parties ont donné lieu à deux brevets (US 6712915 & US 6574968).

• **1995-2000.** Suite à ce stage, j'ai rejoint l'UJF-Grenoble sur un poste d'**Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche** (1994-1995) et effectué une conversion thématique importante pour m'intéresser alors aux propriétés magnétiques et thermodynamiques des supraconducteurs. C'est sur ce projet de recherche que j'ai été recruté en tant que **Maître de Conférences** à l'UJF en 1995 (28<sup>ème</sup> section) et rejoint l'équipe « Oxydes » du Laboratoire d'Etudes des Propriétés Electroniques des Solides (CNRS, Grenoble). Durant cette période mon activité de recherche a été essentiellement centrée sur l'étude des transitions de phases dans le composé (K,Ba)BiO<sub>3</sub>. Peu étudié du fait de conditions de synthèse particulièrement délicates, ce système nous a néanmoins permis d'effectuer une étude détaillée des propriétés thermodynamiques et dynamiques des vortex (état mixte) [voir résumé 1]. Après avoir activement participé à l'encadrement de trois doctorants j'ai passé mon **Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches en 2000**. Ce travail m'a également permis d'intégrer l'Institut Universitaire de France (membre junior, 2001) et j'ai été nommé au Conseil National des Universités en 2000. Pendant cette période j'ai été très impliqué dans l'enseignement des travaux pratiques (à Grenoble et Valence). De 1994 à 1998, j'ai été responsable de la partie "optique" du pool de TPs de Licence, et j'ai également eu l'occasion d'encadrer plusieurs cours et TDs de premier cycle et Licence au près des étudiants handicapés moteur de l'université (SAUH, 1995-1999).

• **2001-2005.** Suite à la découverte d'une supraconductivité dite "multi - gap" dans le composé MgB<sub>2</sub> (2001) [voir résumé 2] j'ai réorienté (en partie) mon activité sur ce nouveau composé. Durant cette seconde période, j'ai continué à être fortement impliqué dans l'enseignement des TPs (notamment en magnétisme) et j'ai encadré les travaux dirigés de Physique du Solide en Master I de Physique et Physique - Chimie. J'ai été nommé sur un poste de **Professeur des Universités** (PR2, UJF) en 2002. Entre 2002 et 2005, j'ai été membre du conseil scientifique du "Groupement De Recherche" (GDR-2284) sur les "systèmes élastiques désordonnés", en organisant notamment l'école thématique du GDR (2004). J'ai également été membre du comité "structures magnétique" chargé de l'attribution du temps de faisceau de neutrons à l'Institut Laue Langevin de Grenoble (2004-2006). Enfin en 2003 j'ai pris la responsabilité du Magistère de Physique de Grenoble (jusqu'en 2007) et j'ai été membre du conseil de l'UFR (2002-2006).

• **2006-2012.** L'année 2004 a été marquée par la découverte de la supraconductivité dans le diamant (dopé) [voir résumé 3]. Connu pour être le prototype des isolants et le matériau le plus dur qui soit, la question de savoir si le diamant pouvait éventuellement être supraconducteur n'avait pas reçu de réponse avant 2004. Pourtant il l'est bien (lorsqu'il est dopé au bore) et il constitue alors une plate-forme particulièrement intéressante pour l'étude de la transition isolant - supraconducteur. Je me suis alors en partie orienté vers cette nouvelle thématique, qui reste aujourd'hui encore largement débattue. Par ailleurs, je me suis également très fortement impliqué dans l'étude des nouveaux supraconducteurs à base de Fer [voir résumé 4] découverts en 2008. Cette découverte fut une fois de plus totalement inattendue car ces systèmes allient propriétés

magnétiques et supraconductrices, a priori totalement antagonistes, et pourtant leur température critique est particulièrement élevée (jusqu'à 55K). En 2008, j'ai rejoint le groupe « Magnétisme et Supraconductivité » du département Matière Condensée & Basses Températures de l'Institut Néel (CNRS - Grenoble). Pendant cette période j'ai également été amené à mettre en place plusieurs cours magistraux en Supraconductivité (M2), Physique du Solide (M1) et en Mécanique Quantique (L3). Comme tout au long de ma carrière, j'ai continué à m'impliquer dans l'enseignement des TPs, et nous avons travaillé à la mise en place de nouveaux TPs au sein même de notre laboratoire, permettant d'illustrer le cours de Physique du Solide de Master I. J'ai été promu au grade de **Professeur 1<sup>ère</sup> classe** en 2007. En 2006-2007 j'ai participé à l'organisation du congrès général de la SFP (Grenoble - Juillet 2007, chargé des relations avec les étudiants) et en 2012-2014 j'ai été membre du "National Advisory Board" de la conférence "Strongly Correlated Electronic Systems" (Grenoble-2014). J'ai été membre du Conseil Scientifique et Technique du Département Matière Condensée et Basses Températures de l'Institut Néel et du Conseil du Laboratoire (Institut Néel) de 2009 à 2011, et membre du conseil de l'UFR (PhITEM, 2011-2015). Néanmoins durant cette période la plus grande partie de mon activité administrative a été consacrée à la responsabilité du Master 1 de Physique (2006-2012).

• **2013-2017.** Plusieurs découvertes importantes ont récemment relancé le débat sur l'origine de la supraconductivité dans les composés à haute température critique. Pour « revisiter » ces systèmes complexes, des développements instrumentaux majeurs ont été – et sont toujours – nécessaires et nous avons alors pu effectuer la première étude détaillée de leurs propriétés thermodynamiques sous champs magnétiques intenses. Par ailleurs j'ai pris la charge de la mention physique (master) en 2012. J'ai mené l'ensemble des discussions qui ont conduit à la nouvelle offre de formation. Cette offre, plus complète (avec notamment la mise en place de parcours plus appliqués en lien avec Grenoble-INP) et moins cloisonnée (avec la mise en place de passerelles bi-disciplinaires) a été mis en place à la rentrée 2016. J'ai été promu au grade de **Professeur de classe exceptionnelle 1<sup>ère</sup> échelon** en 2013 (3<sup>ème</sup> chevron au 01/09/2015). Enfin j'ai repris le cours de mécanique quantique de M1 en 2015 et j'ai été élu membre du conseil du pôle de recherche « Physique – Ingénierie - Matériaux » de la Communauté – Université - Grenoble - Alpes (COMUE) la même année.

## Activité scientifique :

Mon activité scientifique est centrée sur l'étude des **supraconducteurs**. Il s'agit principalement d'une activité expérimentale pour laquelle j'ai notamment effectué d'importants développements instrumentaux qui m'ont permis de mettre en place des mesures magnétiques (aimantation locale) et thermodynamiques (chaleur spécifique) [voir aussi paragraphe 6]. L'étude de la supraconductivité semblait avoir touché à sa fin lorsque Bardeen, Cooper et Schrieffer donnèrent une description microscopique du mécanisme d'appariement des électrons mais la découverte des supraconducteurs à haute température critique (en 1986) démontra que certains systèmes ne peuvent pas être décrits par cette théorie. La compréhension du mécanisme à l'origine de cette supraconductivité dite non - conventionnelle reste un des enjeux majeurs de la physique du solide moderne, mais ces composés présentent également un tout autre intérêt. Comme tous les alliages, il s'agit de supraconducteurs dits de type II, pour lesquels le champ magnétique peut pénétrer sous la forme de vortex. Néanmoins la distribution de ces vortex est ici très singulière et ces composés se sont avérés être des outils très riches pour l'étude (générique) des transitions de phases dans les systèmes élastiques désordonnés.

En effet, en l'absence de défauts, les interactions (élastiques) entre vortex conduisent à un réseau hexagonal, mais ces vortex sont en fait très sensibles à la présence de défauts et, lorsque le désordre devient important, la distribution aléatoire des défauts conduit à une distribution également désordonnée des vortex. La particularité des supraconducteurs à haute  $T_c$ , est que ces deux interactions y sont du même ordre et la question de savoir quelle serait alors la structure des

vortex s'est donc rapidement posée. T. Giamarchi et P. Le Doussal montrèrent qu'il devait exister (comme dans tous système élastique désordonné : ondes de densité de charge, domaines magnétiques, etc..) un nouvel état de la matière ni totalement ordonnée ni complètement désordonnée, baptisé verre de Bragg. Une analyse détaillée de mesures de diffraction de neutrons nous a permis d'amener la **première preuve expérimentale de l'existence de ce verre de Bragg** (voir [16] et résumé 1). Enfin, dans les supraconducteurs à haute  $T_c$ , les fluctuations thermiques sont fortes et la situation se complique encore car élasticité, désordre et fluctuations thermiques deviennent alors tous trois importants. Nous avons montré que **désordre et fluctuations thermiques peuvent également modifier la transition entre l'état supraconducteur et l'état normal** (voir [19, 21, 23]).

La découverte en 2001 d'une supraconductivité à 40K dans un composé conventionnel :  $MgB_2$  fut une surprise de taille. Mais ce composé présente lui aussi une seconde particularité : il s'agit du premier composé dans lequel la supraconductivité se développe sans ambiguïté sur deux bandes presque totalement découplées. Tous se passe alors comme si deux supraconducteurs coexistaient dans un même matériau. Nous avons été le **premier groupe à montrer la coexistence de ces deux supraconductivités** (voir [18] et résumé 2). Cette coexistence conduit à des particularités de l'état mixte et nous avons réalisé les premières études détaillées du diagramme de phases H-T dans ce système [20-23,27] et nous avons effectué **une étude détaillée de la transition ordre - désordre dans le solide de vortex** [34] en modulant le désordre par irradiation.

La température critique particulièrement forte de  $MgB_2$  résulte d'un couplage électron - phonon particulièrement fort dans ce composé covalent. Les systèmes covalents les plus connus sont probablement le diamant et le silicium mais dans ces derniers les liaisons covalentes se situent très en dessous du niveau de Fermi. Il est bien sur possible de les doper pour les rendre métalliques mais doper un isolant pour en faire un supraconducteur ne semblait pas être une idée judicieuse tant ces deux états électroniques sont opposés (voir [31] et résumé 3). Pourtant la  $T_c$  du diamant dépasse 10K, bien que la densité électronique y soit cent fois plus faible que dans les métaux. Notre groupe a joué un rôle majeur **dans l'étude des propriétés supraconductrices de ces systèmes**, et particulièrement du **lien entre les transitions isolant – métal et métal – supraconducteur** [24, 33, 65]. Un effort très important d'amélioration de la qualité des échantillons nous a récemment permis de « revisiter » l'influence du dopage et de la dimensionnalité sur les propriétés électroniques de ce composé [39].

De nouveaux composés dont la  $T_c$  dépasse cette fois 55K ont été découverts au printemps 2008. Une fois de plus ces composés présentent une particularité inattendue : la présence simultanée de propriétés supraconductrices et magnétiques, en principe antagonistes (composés à base de fer). La supraconductivité est même probablement liée aux fluctuations de spins et le magnétisme ne serait alors plus un frein à la supraconductivité mais au contraire un élément nécessaire à son apparition. Nous avons effectué des études détaillées du diagramme de phases H-T de plusieurs systèmes qui nous ont permis de mettre en évidence **l'influence des corrélations électroniques** dans le  $Fe(Se,Te)$  ([70,76] et résumé 4) et d'effectuer une analyse très complète **des effets de brisure de paires liées à ce mécanisme de couplage original** (dans  $Ba(Fe,Ni)_2As_2$  [75]). Enfin nous venons de finaliser une étude détaillée de la symétrie des gaps dans  $FeSe$  [41].

Le fait que la phase supraconductrice se développe au voisinage d'une autre instabilité (ici magnétique) est un élément commun à la grande majorité des nouveaux supraconducteurs. Comprendre si le mécanisme de couplage à l'origine de la supraconductivité s'appuie sur cette seconde instabilité ou si au contraire les deux transitions sont en compétition est donc aujourd'hui un élément clé dans l'étude de la supraconductivité. Dans certains systèmes cette seconde instabilité est électronique. C'est notamment le cas des dichalcogénures ( $NbSe_2$ ,  $Cu-TiSe_2$ ,...) pour lesquels la supraconductivité coexiste avec une onde de densité de charges et nous avons notamment mis en évidence pour la première fois **un très étonnant effet dit de lock-in des vortex** dans  $Cu-TiSe_2$  [39]. En effet, pour une raison encore inconnue les vortex tendent à

s'aligner le long des feuilletts de la structure hexagonale, l'origine de cet effet, observé jusqu'à lors que dans les systèmes très fortement anisotropes, reste ici à être déterminée.

Enfin, la mise en évidence d'une reconstruction majeure de la surface de Fermi dans les cuprates sous-dopés, associée là aussi à la formation d'un ordre de charge a récemment relancé le débat sur l'origine de la supraconductivité dans ces composés. La compréhension de ce mécanisme passe désormais par une étude détaillée de l'état « normal » (mais extrêmement complexe) de ces systèmes. Il est en effet essentiel de déterminer la nature des différentes phases entrant en compétition (dont la supraconductivité) et nous avons effectué **les premières mesures calorimétriques du diagramme de phases H-T jusqu'à 36T** dans ces systèmes (voir [37] et résumé 5). En 2016, un effort expérimental important nous a permis de compléter cette étude et de réaliser une étude détaillée de l'évolution du **coefficient de Sommerfeld au voisinage des points critiques quantiques** dans ces composés.

## Publications Significatives :

"EVIDENCE OF THE BRAGG GLASS PHASE BY NEUTRON SCATTERING"

T.Klein, I.Joumard, S.Blanchard, J.Marcus, R.Cubitt, T.Giamarchi, P.Le Doussal  
Nature 413, 404 (2001).

Dans cette article nous présentons une analyse détaillée des pics de diffraction de neutrons issus de la distribution des vortex dans un supraconducteur de type II ((K,Ba)BiO<sub>3</sub>). Pour un cristal parfait, ces pics sont des pics « delta » simplement élargis par la résolution instrumentale alors que dans un système désordonné on s'attend au contraire à observer des pics très larges – et de faible intensité – permettant de remonter à la longueur de corrélation locale. Nous avons montré que pour les vortex dans un supraconducteur – et plus généralement dans tous les systèmes pour lesquels les interactions élastiques entre les particules (ici les vortex) et les interactions avec les défauts sont du même ordre de grandeur - les pics de diffraction n'entrent dans aucune de ces deux catégories et permettent de caractériser un nouvel état de la matière, baptisé verre de Bragg par T. Giamarchi et P. Le Doussal (qui en avait prédit l'existence). Ce travail (voir aussi [13]) a permis d'amener la première preuve expérimentale de l'existence de ce nouvel état de la matière, il a fait l'objet d'une conférence invitée lors de l'APS March Meeting de 2000 [89].

"EVIDENCE FOR TWO GAPS IN MgB<sub>2</sub> BY POINT CONTACT SPECTROSCOPY"

P.Szabo, P.Samuely, J.Kacmarcik, T.Klein, J.Marcus, D.Fruchart, et al.  
Physical Review Letters 87, 137005 (2001).

MgB<sub>2</sub> est un composant d'une étonnante simplicité chimique et cristallographique et pourtant la découverte de ces propriétés supraconductrices en 2004 a été à l'origine d'un très vif intérêt de la communauté. Tout d'abord car sa température critique est étonnamment élevée pour un supraconducteur conventionnel (~ 39K soit près de deux fois celle du record précédemment établi dans Nb<sub>3</sub>Ge) mais surtout parce que c'est le premier système pour lequel la supraconductivité se développe simultanément dans deux bandes presque totalement découplées et aux propriétés très différentes (les liaisons  $\pi$  et  $\sigma$  du Bore). Tout se passe alors comme si deux supraconducteurs (un avec une  $T_c$  de l'ordre de 10K - bande  $\pi$  - et l'autre avec une  $T_c$  de 40K – bande  $\sigma$ ) coexistaient dans un même système. En collaboration avec P.Szabo, collègue Slovaque alors en visite dans notre groupe (Maître de Conférences invité de l'UJF), nous avons amené la première preuve expérimentale – par spectroscopie de pointe - de cette coexistence. Cet article se situe dans le top 15 des articles les plus cités sur MgB<sub>2</sub> (sur environ 6000).

## "SUPERCONDUCTING GROUP-IV SEMICONDUCTORS"

X.Blase, E.Bustarret, C.Chapelier, T.Klein et C.Marcenat  
Nature Materials 8, 375 (2009).

Associer semi-conducteurs et supraconducteurs peut a priori sembler être une idée surprenante tant les propriétés électroniques de ces deux états sont opposées. Néanmoins, dans les supraconducteurs conventionnels, la supraconductivité est le résultat du couplage entre les électrons et les phonons et ce couplage est particulièrement fort dans les semi-conducteurs du groupe IV (notamment le diamant). Leur caractère semi-conducteur est dû au fait que les électrons sont impliqués dans les liaisons qui assurent la cohésion du matériau (liaisons covalentes) et n'interviennent pas dans la conductivité. En rendant ces liaisons conductrices par dopage chimique on obtient une nouvelle famille de supraconducteurs ouvrant la voie sur une physique très riche alliant supraconductivité et transition métal - isolant. Ce « progress article » est une revue centrée sur les propriétés des composés existants (diamant et silicium) mais également sur les perspectives possibles puisque les calculs ab-initio ont permis de prédire de nouvelles structures qui pourraient être supraconductrices à des températures largement au dessus de 100K (même si aucun de ces systèmes n'a encore pu être réalisés expérimentalement).

## "THERMODYNAMIC PHASE DIGRAM IN $\text{Fe}(\text{Se}_{0.5},\text{Te}_{0.5})$ SINGLE CRYSTALS UP TO 28T"

T.Klein, D.Braithwaite, A.Demuer, C.Marcenat, P.Rodière, et al.  
Physical Review B, 82, 184506 (2010).

La découverte en 2008 d'une nouvelle famille de supraconducteurs à base de Fer a pris une fois de plus la communauté de cours. En effet, alors que magnétisme et supraconductivité étaient considérés jusqu'à là comme deux propriétés antagonistes, il semblerait que le magnétisme du fer soit ici un élément essentiel du couplage (non conventionnel) permettant atteindre des températures critiques particulièrement élevées (jusqu'à 55K dans certains cas). Ce travail est une étude détaillée du diagramme de phase H-T d'un de ces composés ( $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$  de  $T_c \sim 15\text{K}$ ). Elle est notamment basée sur des mesures de chaleur spécifique en condition extrême de champs magnétiques qui ont permis de mettre fin à la polémique sur la ligne  $H_{c2}(T)$  qui était née de mesures de transport (donc non thermodynamiques) et de mettre en évidence le rôle important des corrélations électroniques dans ce système. Elle est fruit d'une collaboration étroite alliant différentes techniques expérimentales (chaleur spécifique donc mais également aimantation locale complétée par d'autres mesures magnétiques et des mesures de transport en champs pulsés) qui ont permis de faire une description complète du diagramme H-T (lignes  $H_{c2}$  et  $H_{c1}$ ). Ce travail a été présenté lors de plusieurs séminaires invités (Grenoble, Saclay, Los Alamos).

## "DETERMINATION OF THE MAGNETIC PHASE DIAGRAM OF UNDERDOPED $\text{YBaCuO}$ SINGLE CRYSTALS"

C.Marcenat, A.Demuer, K.Beauvois, B.Michon [...] et T.Klein  
Nature communications 6, 7927 (2015).

Pendant près de trois décennies, les supraconducteurs à haute température critique ont été principalement considérés comme des isolants de Mott dopés, soumis à de fortes fluctuations magnétiques conduisant à l'existence de la - toujours mystérieuse - phase dite "pseudo-gap". La découverte d'une phase *ordonnée en charges* dans  $\text{YBaCuO}$  sous - dopé a récemment relancé le débat sur le mécanisme d'appariement dans ces supraconducteurs. En effet, il a été montré que cette phase ordonnée est associée à une reconstruction importante de la surface de Fermi qui conduit à l'existence de (petites) poches d'électrons dans ce matériau dopé trous. Comprendre cet état normal complexe est maintenant une étape essentielle vers la description du mécanisme d'appariement. Dans cet article nous présentons la première détermination colorimétrique du diagramme de phases H-T dans des monocristaux sous - dopés. Nous avons obtenu la première mise en évidence thermodynamique de la transition vers l'état normal permettant une détermination précise du coefficient Sommerfeld, nous permettant de poser de fortes contraintes sur les modèles théoriques proposés pour la reconstruction de la surface de Fermi. Ces résultats ont récemment été présentés à plusieurs conférences internationales [112,165].