

# **Rapport scientifique du laboratoire Photons Et Matière**

CNRS UPR A0005

LABORATOIRE PHOTONS ET MATIÈRE,  
ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris cedex 05



# 1 Nanophysique, Nanostructures et Nanomatériaux

## 1.1 Introduction

Le laboratoire possède une forte composante scientifique dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. Malgré leur apparente disparité (nanophotonique, nanothermique, nanomécanique, nanochimie, nanoélectronique, nanomatériaux), les travaux réalisés au cours des quatre dernières années sont complémentaires, originaux et prometteurs.

Dans le domaine de la nanophotonique, des axes de recherche originaux sont récemment apparus. Ils sont liés au développement de nouveaux types de sondes optiques locales : nanosonde thermique sans source laser, nanosonde fluorescente à balayage, nanosonde spécialisée dans la détection de phénomènes non-linéaires. La nanosonde thermique sans source laser, qui détecte localement le rayonnement thermique d'une surface, a par exemple permis d'imager la densité optique d'états dans des nanostructures. Son avènement ouvre une nouvelle ère dans les nanosciences, dont l'impact en optique ressemblera peut être à celui du STM en physique des solides. La nanosonde fluorescente à balayage, qui est une petite particule fluorescente fixée à l'extrémité d'une pointe, permet aussi de visualiser très simplement le champ électromagnétique total à la surface de nanostructures et d'étudier des effets de polarisation et de propagation d'ondes plasmoniques. De plus, sa sensibilité à de nombreux effets physiques (température, champ électrique, champ magnétique), lui confère un rôle de nanodétecteur universel. Les sondes de champ proche développées au LPEM permettent à présent d'étudier des dispositifs en fonctionnement pour sonder les variations locales de la température de nano-circuits ou le champ électromagnétique à la surface de lasers à cascade quantique. Les premiers résultats obtenus au LPEM indiquent que les données fournies par les sondes optiques de champ proche peuvent jouer un rôle déterminant dans les processus de développement et d'optimisation de nouveaux nano-dispositifs électroniques ou optiques. Enfin, la possibilité d'imager des phénomènes non-linéaires locaux (génération de deuxième harmonique, stimulée ou non par une pointe métallique) a permis et permettra de nouvelles études sur des matériaux complexes, comme des matériaux non centro-symétriques ou nanostructurés aléatoirement.

Dans le domaine de la nanomécanique, le comportement de MEMS peut être visualisé par interférométrie sans balayage, à l'aide d'une caméra. Les propriétés élastiques de leviers micrométriques, leur déformation, ont ainsi été étudiés avec une précision

de quelques nanomètres. En nanothermique, la génération d'ondes thermiques dans des échantillons nanostructurés, l'observation de leur propagation et de leur interaction avec l'environnement permet d'accéder aux propriétés locales en profondeur dans la structure. Les nanostructures étudiées sont par exemple composées d'empilements de couches de matériaux différents, ou sont des composés hétérogènes présentant différentes phases et des joints de grain. La propagation des ondes thermiques dans ces structures dépend fortement de chaque interface ainsi que de la résistance de contact entre les différents matériaux. Les applications des études réalisées sont très importantes dans le domaine de la dissipation de la chaleur dans des composants ou dans des matériaux réfractaires comme des céramiques.

L'activité scientifique récente dans le domaine de la nanochimie comprend la synthèse de nanocristaux semi-conducteurs (quantum dots) du type CdSe/ZnS. Ces nanocristaux fluorescents, dont le rendement quantique est très élevé, présentent un blanchiment beaucoup plus faible que les molécules organiques. Ils sont utilisés par plusieurs équipes du laboratoire pour des applications en nanooptique et en biologie. Les recherches en matière de synthèse consistent à élaborer de nouveaux types de nanocristaux (contenant du magnésium ou du zinc), et des nanocristaux dont la chimie de surface et la fonctionnalisation sont nouvelles pour des applications spécifiques en biologie. L'excellente maîtrise de la synthèse des nanocristaux acquise au LPEM a conduit récemment à des avancées spectaculaires dans ce domaine : nanocristaux exempts de problème de clignotement sur de longues durées, nanobilles dotées d'un code-barre optique, mesure optique de la pression dans les nanocristaux de type cœur/coque, sondes multifonctionnelles pour application *in vivo*. . .

Le laboratoire possède un microscope électronique en transmission à émission de champ. Etant donné la part importante des nanosciences dans les thèmes de recherche du laboratoire, cet outil est devenu incontournable. Il est dédié à l'étude de nanostructures semi-conductrices, ferroélectriques, et à la nanobiologie. L'activité électrique locale de diodes IMPATT et Schottky a pu être étudiée à l'échelle de quelques dizaines de nanomètres. La détermination de l'état de contrainte de multicouches SiGe ainsi que la composition locale d'îlots SiGe, à l'échelle du nanomètre, ont permis de préciser les mécanismes de diffusion des différents composés lors de la croissance des hétérostructures. De même, dans le cas de matériaux ferroélectriques, le microscope a permis la visualisation des nanodomains. Dans le cadre de l'ACI "nanodomains ferroélectriques" nous avons développé avec nos quatre partenaires un protocole qui nous permet de placer sous champ électrique *in situ* la couche ferroélectrique amincie. Cette expérience originale constitue une étape clef fondamentale pour déterminer si les propriétés ferroélectriques sont vraiment conservées dans les oxydes perovskites jusqu'à l'échelle nanométrique.

L'activité nanoélectronique est aussi très présente et spécifique au laboratoire. Elle est liée à la réalisation et à l'étude de nanojonctions Josephson à base de supraconducteurs à haute  $T_c$ . Les jonctions sont réalisées par irradiation locale de films minces supraconducteurs par des ions oxygène. Le bombardement, dont le but est de diminuer la tempé-

rature critique locale du matériau, est effectué en deux temps à des endroits précis sur la couche, et notamment sur une fente de 20 nanomètres de largeur qui va créer la jonction. Les jonctions réalisées par cette technique originale ont été testées au laboratoire et ont montré d'excellentes caractéristiques électriques (courbes courant/tension, courant critique en fonction du champ magnétique appliqué). La modélisation du comportement électrique des jonctions a permis de déduire leur largeur effective et d'évaluer le rôle de la qualité des interfaces sur les mesures. Enfin, d'excellentes caractéristiques Josephson ont aussi été observées sur d'autres types de jonctions formées de trois couches arrangées perpendiculairement au plan de base.

Dans ce thème, nous allons donc détailler les recherches qui ont été réalisées au laboratoire dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. Nous avons divisé le chapitre en deux parties, respectivement nommées 'Nanophysique' et 'Nanostructures et nanomatériaux'. L'activité 'Nanophysique' est essentiellement liée aux ondes et aux photons. L'activité 'Nanostructures et nanomatériaux' concerne davantage les électrons, les matériaux et leur structure, elle possède aussi une plus grande composante technologique.

## 1.2 Nanophysique

Nous avons divisé le sous thème '*Nanophysique*' en quatre parties. La première partie s'intitule '*Plasmonique et ondes de surface*'. Elle concerne des phénomènes optiques locaux créés par des oscillations collectives d'électrons (plasmons). La deuxième partie, qui s'intitule '*Champ proche optique autour de nano-objets individuels*', concerne l'étude de nanostructures individuelles par diverses techniques de microscopies optiques en champ proche. La troisième partie '*Micro et nano-mécanique*' concerne l'étude des propriétés élastiques de leviers. Enfin, la partie '*Micro et nano-thermique*' est liée à l'étude de la propagation des ondes thermiques dans des milieux nanostructurés.

### 1.2.1 Plasmonique et ondes de surface

Les recherches réalisées concernent l'étude de champs évanescents créés par des oscillations collectives d'électrons ou plasmons. Ces plasmons peuvent tout d'abord être localisés autour d'une nanostructure, on parle alors de plasmons de surface localisés. Ils donnent naissance à un champ électromagnétique évanescent, présent autour de la nanostructure. Les plasmons peuvent aussi se propager sur une surface métallique, on parle alors de plasmon polariton de surface. Dans ce cas, ils génèrent un champ électromagnétique propagatif sur la surface (mais s'atténuant lors de la propagation), et évanescents dans sa direction perpendiculaire. Ces différentes ondes ne peuvent pas être détectées par microscopie optique classique car elles sont évanescentes dans la direction d'observation. Pour les observer, nous utilisons des microscopes optiques en champ proche (SNOM pour Scanning Near-field optical Microscopes) dits 'sans ouverture', utilisant comme sonde une pointe métallique diffusante, ou un petit objet fluorescent fixé

à l'extrémité d'une pointe. Les ondes plasmoniques peuvent être excitées à l'aide d'une source extérieure, mais également sous l'effet de la température ou du champ produit dans un milieu actif à l'intérieur de la cavité d'un laser.

### 1.2.1.1 Microscopie optique en champ proche dans l'infrarouge moyen

*Y. De Wilde, P.-A. Lemoine, F. Formanek, R. Colombelli, V. Moreau, L. Wilson*

Articles dans des revues avec comité de lectures : [100, 55, 120, 188, 121, 124]

Conférences invitées : [395, 395]

Communications sans actes : [591, 543, 545, 533, 551, 550]

Ouvrages scientifiques (ou chapitres) : [618, 622]

Autres publications : [627, 628]

Valorisation : [654]

Collaborations : J.J. Greffet, R. Carminati, Laboratoire EM2C - Ecole Centrale Paris, Chatenay-Malabry K. Joulain, Laboratoire d'Etudes Thermiques-CNRS, Futuroscope - Poitiers Y. Chen, Laboratoire Photonique et Nanostructures - CNRS, Marcoussis Ecole Normale Supérieure - Paris R. Colombelli, Institut d'Electronique Fondamentale-CNRS, Orsay L. Wilson, University of Sheffield, Royaume-Uni

Le microscope optique en champ proche (SNOM, Scanning Near Field Optical Microscope) à pointe diffusante est basé sur la diffusion du champ électromagnétique à la surface d'un échantillon par la pointe métallique d'un microscope à force atomique (AFM). L'enregistrement de la lumière diffusée par la pointe du AFM permet de réaliser point par point une image optique de la surface de l'échantillon avec une résolution déterminée par le rayon de courbure de la pointe. Nous avons développé un SNOM à pointe diffusante qui fonctionne dans l'infrarouge à des longueurs d'ondes voisines de  $10\mu m$  et qui atteint une résolution de l'ordre de  $50nm$ , soit deux ordres de grandeur de mieux que celle d'un microscope infrarouge conventionnel. Pour interpréter le contraste dans les images et décrire les courbes d'approches, nous avons développé un modèle théorique qui assimile la pointe à un dipôle ellipsoïdal. Lorsqu'elle est placée au voisinage de la surface, le champ du dipôle-image de la pointe dans l'échantillon s'ajoute au champ au niveau du dipôle-pointe dû à l'éclairement. On en déduit la polarisabilité effective du dipôle-pointe couplé à son image et ensuite la section efficace de diffusion.

Notre équipe s'est récemment engagée dans une collaboration avec l'équipe de l'IEF (R. Colombelli) dans laquelle nous avons montré pour la première fois la possibilité de faire l'image directe par microscopie SNOM d'un mode à la surface d'un laser infrarouge à cascade quantique à confinement par air en fonctionnement. La particularité des lasers produits à l'IEF est d'utiliser un guidage plasmonique des ondes dans la cavité. Dans les dispositifs testés, une partie évanescente du mode émerge au niveau de l'interface entre la région active et l'air, ce qui permet d'effectuer l'imagerie à l'aide du SNOM à pointe diffusante. Nous avons ainsi pu visualiser la figure d'ondes stationnaires formée à l'intérieur de la cavité Fabry Pérot du laser. Des images expérimentales montrant la décroissance du champ évanescent au dessus de la structure ont également été obtenues.

Les résultats des mesures SNOM sont en excellent accord avec les calculs numériques de la distribution du champ électromagnétique sur les dispositifs testés.

### 1.2.1.2 Le microscope à effet tunnel à rayonnement thermique

*Y. De Wilde, F. Formanek, P-A. Lemoine, J.-J. Greffet, R. Carminatti, B. Gralak, K. Joulain, Y. Chen*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [122, 101, 123]

Conférences invitées : [316, 317, 314, 315, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 653]

Communications sans actes : [542, 551, 543, 539, 540, 535, 544, 536, 537, 538, 529, 530, 531, 532, 534, 552]

Autres publications : [630, 631, 626, 629, 632]

Collaborations : J.J. Greffet, R. Carminati - Laboratoire EM2C - Ecole Centrale Paris, Chatenay-Malabry, K. Joulain - LET, Futuroscope - Poitiers, Y. Chen - LPN, Marcoussis Ecole Normale Supérieure , Paris, B. Gralak - Inst. Fresnel, Marseille

La caméra infrarouge intégrée dans un microscope optique conventionnel pour étudier le rayonnement thermique se heurte à la barrière de la diffraction qui limite la résolution à quelques micromètres. Nous avons créé une sonde locale à balayage qui s'affranchit de cette limite et peut effectuer des cartographies du rayonnement thermique avec une résolution nanométrique, et l'avons baptisée le STM à rayonnement thermique (TRSTM, thermal radiation scanning tunnelling microscope). C'est à la base un AFM équipé d'une pointe métallique et d'un porte-échantillon chauffant, combiné avec un microscope travaillant dans l'infrarouge. Le montage permet de détecter, dans une gamme de longueurs d'onde voisines de  $10\mu m$ , la lumière issue du rayonnement thermique en champ proche diffusé par la pointe à la surface de l'échantillon. L'enregistrement de cette lumière pendant les balayages produit une image du rayonnement thermique émis à la surface avec une résolution qui ne dépend que du rayon de courbure de la pointe. La situation dans le TRSTM est fondamentalement différente de celle qu'on obtient en illuminant l'échantillon avec un faisceau laser dont la direction de propagation et la polarisation conduisent à privilégier l'excitation de certains modes. Le TRSTM est l'analogue électromagnétique du microscope à effet tunnel car il permet de mesurer la densité locale d'états des photons (EM-LDOS) à la surface de l'échantillon. Les mesures TRSTM réalisées sur des motifs en or déposés sur du carbure de silicium ont révélés pour la première fois la cohérence spatiale du rayonnement thermique de champ proche associés à l'excitation de plasmons de surfaces sur l'or.

### 1.2.1.3 Nano-ouvertures et ondes de surface

*L. Aigouy, B. Samson*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [28, 55, 30]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [253, 254]

Conférences invitées : [266]

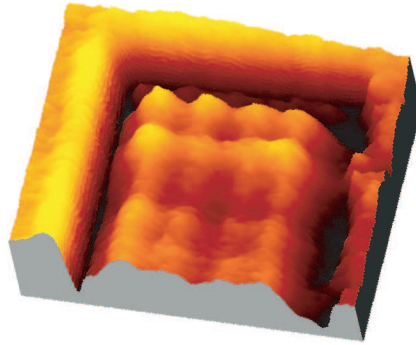


FIG. 1.1: Image de la EM-LDOS obtenue par TRSTM montrant le confinement de plasmons de surface dans un corral électromagnétique rectangulaire

Communications avec actes : [422]

Communications sans actes : [508, 507, 506]

Ouvrages scientifiques : [618]

Autres publications : [632]

Collaborations : V. Mathet - IEF, Orsay, J. Giérak - LPN , Marcoussis, P. Lalanne - LCFIO, Palaiseau

Les plasmons polaritons sont des ondes de surface se propageant sur des films minces métalliques. Ces ondes peuvent transporter la lumière sur des distances très supérieures à la longueur d'onde tout en restant confinées à la surface. Une façon de créer ces ondes est de nanostructurer un échantillon en créant par exemple des nano-ouvertures. A l'aide d'un SNOM, nous avons par exemple visualisé les ondes de surface créées par des nanofentes réalisées dans un film d'or.

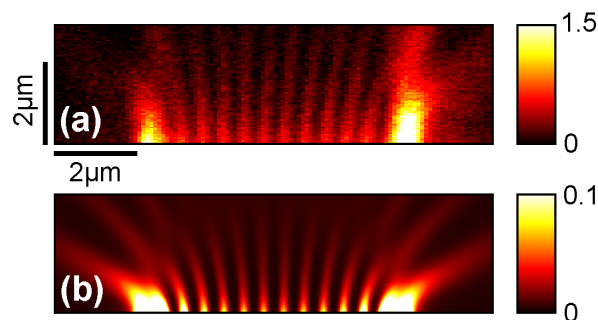


FIG. 1.2: Visualisation 3D de la divergence de la lumière à la sortie de deux fentes parallèles éclairées : (a) expérience SNOM et (b) simulation théorique (P. Lalanne, LCFIO)

Nous montrons sur la figure 1 la distribution de champ électromagnétique entre deux fentes parallèles creusées dans un film d'or et éclairée en transmission par une diode



laser à  $\approx 975\text{nm}$  polarisée linéairement (TM). Le détecteur est une particule fluorescente fixée à l'extrémité d'une pointe de tungstène. La fabrication de ce type de sonde est décrite dans le paragraphe 'instrumentation' de ce rapport. L'image expérimentale a été obtenue dans un plan perpendiculaire à la surface. Chaque fente crée des ondes de surfaces qui, en se rencontrant, donnent naissance à la figure d'interférence. Les expériences ont été corrélées à des calculs numériques effectués par P. Lalanne au LCFIO, et ont montré que ces ondes de surface étaient composées à la fois d'un plasmon polariton et d'une onde quasi-cylindrique rapidement atténuée.

#### 1.2.1.4 Localisations et exaltations

*S. Grésillon, J-C. Rivoal, A.K. Kildishev, A.-S. Grimault L. Willame, A. Lismonde*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [137]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [264, 262]

Conférences invitées : [416, 355, 356, 415]

Communications sans actes : [617, 614, 615, 616, 515, 589]

Ouvrages scientifiques (ou chapitres) : [622]

Collaborations : Vladimir Shalaev - Purdue University, IN (USA), Tuan Vo Dinh - Duke University, VI (USA), Alexandra Boltasseva - COM-DTU (Danemark), Emmanuel Fort - MPQ, Université Paris 7 (France), Vincent Studer, Lab - Neurobiologie, CNRS Paris (France), Sandrine Leveque-Fort - Lab. Photophysique Moléculaire, CNRS-Université Paris XI (France)

Les effets géométriques et la résonance plasmon de surface sur des films semi-métalliques aléatoires ou ordonnés donnent lieu à des exaltations localisées de champs électromagnétiques. La localisation du champ électromagnétique sur des zones très petites, parfois beaucoup plus petites que la longueur d'onde, et les fortes exaltation de champ présentent dans ces zones, sont à l'origine de progrès substantiels partout où la lumière joue un rôle important (applications biomédicales, technologies de l'information, caractérisation chimique etc.).

La localisation optique est liée au désordre d'une part (c'est l'analogue de la localisation électronique), et d'autre part aux effets géométriques et résonants. Celle qui apparaît sur des films métalliques aléatoires est une combinaison d'effets propagatifs (les plasmons polaritons de surface) et localisés (les résonances plasmons de surface) dont l'importance relative est encore source de débats. Ces effets d'exaltation sont un centre d'intérêt du laboratoire depuis que nous avons montré que les effets de désordre dans les films aléatoires étaient essentiels.

Avec T. Vo Dinh (Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA) et avec N. Kotov (Oklahoma State University, USA), nous avons mesuré la forte inhomogénéité spatiale de la distribution de champ locale sur ces films ordonnés. Nous avons pu observer la localisation du champ électrique sur les bords des nanoparticules. En changeant la longueur d'onde d'illumination autour des résonances plasmons des billes et des

différents axes des triangles, nous avons aussi montré que la position des zones où le champ est localisé dépendait fortement de ces paramètres.

Avec des trous circulaires dans des couches métalliques - collaborations du GDR champ proche optique et avec E. Fort - ainsi qu'avec des billes d'or ou d'argent lors d'un travail avec A-S Grimault et le chercheur invité A Kildishev de l'université de Purdue (IN, USA), nous cherchons à mieux comprendre la localisation géométrique et résonante aux échelles fortement sub-longueur d'onde sur des objets métalliques uniques simples.

Parallèlement nous poursuivons notre travail sur les films métalliques aléatoires et ordonnés, avec E. Fort (MPQ, Paris), S. Leveque (LPPM, Orsay) et A. Boltasseva (TUM, Danemark) et le doctorant A. Lismonde. Ce projet sur l'exaltation de fluorescence par effets de surface est possible grâce à l'utilisation d'un nouvel outil d'imagerie SNOM pour les effets non-linéaires développé ces dernières années au laboratoire. Nous voulons utiliser les exaltations locales de champs sur des films métalliques aléatoires ou sur des nano-antennes (article accepté pour publication dans Opt. Exp.) comme sources lumineuses de taille nanométrique (nano-sources lo-cales).

## 1.2.2 Champ proche optique autour de nano-objets individuels

La vision que l'on va avoir d'un nano-objet va être très différente suivant que nous l'observons à l'aide d'un mi-croscopie optique classique ou par un microscope optique en champ proche. En champ proche, nous allons plonger une pointe dans un champ non propagatif localisé autour d'une nanostructure éclairée. La pointe joue simultanément le rôle d'un nanodétecteur de champ et d'une nanosource de lumière. Pour comprendre les mécanismes de formation des images, nous avons étudié de nombreux types de nano-objets isolés : nanoparticules métalliques et diélectriques, nano-ouvertures, nanocristaux fluorescents ou non linéaires.

### 1.2.2.1 Champ évanescent autour de nanoparticules métalliques et diélectriques

*L. Aigouy, A. Fragola*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [29, 33, 31, 127, 126]

Conférences invitées : [395]

Communications avec actes : [422, 459, 460, 419, 418]

Communications sans actes : [509, 510, 554]

Ouvrages scientifiques (ou chapitres) : [622]

Collaborations : V. Mathet, P. Beauvillain - IEF, Orsay, J. Giérak - LPN, Marcoussis, M. Mortier - LCMCP, ENSCP, Paris

Les nanoparticules métalliques présentent la propriété de bien diffuser la lumière dans l'espace lorsqu'elles sont éclairées. De plus, un champ électromagnétique important est localisé à courte distance de nanoparticules métalliques. De façon à évaluer son importance, nous avons étudié un échantillon composé de nanosphères métalliques et

diélectriques d'environ  $250\text{nm}$  de diamètre déposées sur une surface de verre. L'éclairage est réalisé en transmission sous incidence normale à l'aide d'un laser à  $975\text{nm}$  non polarisé. La sonde SNOM est une particule fluorescente fixée à l'extrémité d'une pointe de tungstène. La topographie montre des sphères isolées, de même taille, il est donc impossible de savoir quelle sphère est en or et laquelle est en latex. Par contre, l'image optique en champ proche montre que la fluorescence augmente lorsque la pointe est située sur certaines particules, mais qu'elle n'augmente que très faiblement sur d'autres. La raison de cette différente distribution de champ est que les sphères sur lesquelles se produit l'augmentation importante de fluorescence sont en or, alors que les autres sont en latex. Cette étude permet d'évaluer de façon quantitative l'exaltation du champ autour de nanoparticules.

Dans le même ordre d'idée, nous avons aussi visualisé des nano-objets fluorescents isolés sur des surfaces par SNOM à sonde diffusante. L'étude a permis d'étudier les mécanismes de formation des images par cette technique. Des mesures ont aussi pu être réalisées dans des liquides pour des applications dans le domaine de la biologie.

### **1.2.2.2 Nano-objets circulaires et nano-cristaux : effets de polarisation linéaire et non-linéaire**

*J-C. Rivoal, S. Grésillon, L. Willame*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [113, 137, 161, 175]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [265]

Conférences invitées : [395, 414]

Communications sans actes : [592, 617]

Collaborations : Claudine Bainier, Daniel Courjon - Lab. Femto, Besançon (France), Emmanuel Fort - MPQ, Univ Paris 7 (France), Mireille Cuniot-Ponsard - Lab. Charles Fabry, Orsay (France), David Richards - Kings College, Londres (UK),

Avec des billes d'or d'une dizaine de nanomètres de diamètre et des trous circulaires dans des films minces métalliques évoqués ci-dessus, nous avons comparé l'influence de la polarisation de l'onde incidente sur la distribution de champ mesuré par SNOM sans ouverture avec ceux obtenus par l'équipe de D. Courjon (Laboratoire Femto, Besançon) par SNOM avec ouverture. Cela a permis de conclure sur la nature axiale du champ électrique détecté dans les expériences en mode transmission réalisées au laboratoire. Inversement, les expériences de l'équipe de Besançon semblent être directement sensibles à l'énergie (vecteur de Poynting) diffusée (articles publiés dans Appl. Phys. B et dans Eur Phys J. Appl. Phys).

Afin d'améliorer la sensibilité de notre imagerie, deux détecteurs en mode réflexion dont un compteur de photons, ont été ajoutés au détecteur en mode transmission. Tout d'abord, ce développement permet une comparaison directe des modes réflexion et transmission en SNOM ainsi que des effets de la sonde métallique, sujets de nombreuses polémiques dans la communauté du champ proche optique française et internationale. De plus, l'ajout d'un compteur de photons bas bruit nous permet aujourd'hui d'atteindre

un niveau de détection exceptionnel dans les expériences de champ proche optique, soit un photon de champ proche par seconde lorsque le rapport entre l'intensité de champ proche et l'intensité de champ lointain est de  $10^{-3}$ .

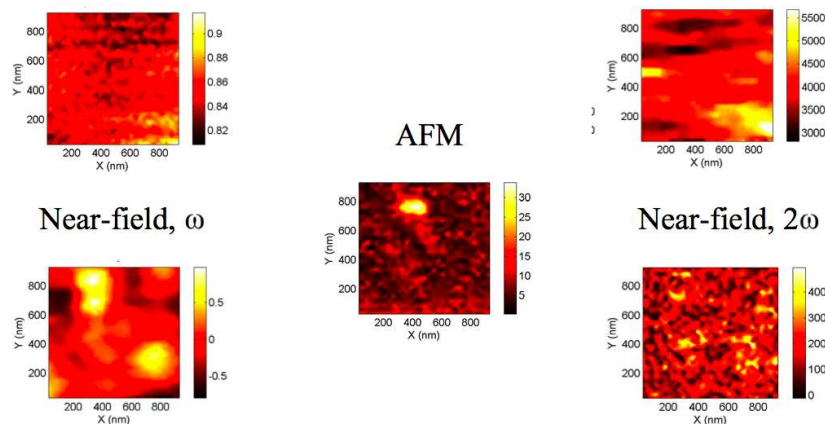


FIG. 1.3: Visualisation 3D de la divergence de la lumière à la sortie de deux fentes parallèles éclairées : (a) expérience SNOM et (b) simulation théorique (P. Lalanne, LCFIO)

Cette amélioration de la sensibilité nous a permis de développer un système d'imagerie SNOM pour les effets non-linéaires. Ceci a fait l'objet d'une collaboration avec l'équipe de M. Cuniot Ponsard (Laboratoire Charles Fabry, Orsay) pour l'étude de l'homogénéité spatiale du dépôt de SBN en couche mince (Strontium de Barium Niobate, possédant un coefficient électro-optique et un coefficient non-linéaire de second ordre élevés). La mesure des variations de génération de second harmonique est celle de l'orientation relative des différents nano-cristaux de SBN (voir figure 9). L'utilisation de plusieurs détecteurs permet de comparer directement les effets linéaires et non-linéaires à l'échelle nanométrique. Ce travail de thèse de L. Williame a donné lieu à une publication dans *J. Appl. Phys* en 2007.

### 1.2.3 Micro et nanomécanique

*F. Amiot, C. Boccara, N. Garraud, J-P. Roger*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [40, 41, 39, 38]

Communications avec actes : [437, 427, 432, 433, 434, 435, 436, 428, 429, 430, 431, 426, 423, 424, 425, 463, 464, 462]

Communications sans actes : [511]

Collaborations : Francois Hild - Laboratoire de Mécanique et Technologie de l'ENS Cachan (LMT-Cachan), Frederic Kanoufi - Laboratoire Environnement et Chimie Analytique de l'ESPCI (LECA),

Les dimensions caractéristiques des systèmes micromécaniques tels des microleviers (de l'ordre de quelques dizaines de micromètres dans le plan et du micromètre en épais-

seur) conduisent à un rapport surface volume élevé, de sorte que le comportement de ces systèmes est dominé par des effets de surface, plutôt que de volume. C'est ce qui en fait des capteurs très sensibles à leur environnement. Plusieurs équipes ont montré la sensibilité des microleviers pour la détection de réaction d'adsorption, d'hybridation, etc. . . La mesure consiste à suivre le déplacement de l'extrémité libre du levier par la déflexion d'un faisceau laser focalisé sur celle-ci selon le principe de l'AFM. Cependant l'information expérimentale, réduite à la seule mesure de la flèche du levier, est trop sommaire pour une exploitation quantitative visant à discriminer des modèles de comportement dans l'analyse des effets mécaniques induits. Dans ce contexte, nous avons développé un instrument original basé sur le principe de l'imagerie interférométrique différentielle à décalage de type Nomarski, pour réaliser une mesure sensible, in situ et en temps réel du champ de déplacements hors plan des surfaces observées avec une reproductibilité d'environ  $10\text{pm}$ . Ce travail a fait l'objet de la thèse de F. Amiot effectuée en codirection avec F. Hild du Laboratoire de Mécanique et Technologie de l'ENS Cachan (LMT Cachan) et soutenue fin 2005. L'objectif de cette collaboration est de mener une étude amont, du comportement mécanique d'un microsystème en interaction avec son environnement.

L'exploitation des mesures de champ de déplacement pour l'identification des propriétés élastiques hétérogènes des microstructures étudiées est rendue difficile du fait des inconnues sur le champ et le type de chargement, en particulier dans une application capteur. Il faut alors chercher à identifier simultanément les champs de propriétés élastiques et de chargement à partir du champ de déplacements mesuré. Une approche que nous avons mise en œuvre est d'utiliser une technique d'identification basée sur une "méthode d'écart à l'équilibre". Elle consiste à discrétiser la structure en éléments finis et à poser les conditions d'équilibre de chacun des nœuds comme la minimisation de l'énergie potentielle élastique. Un indicateur d'erreur permet de qualifier la qualité de l'identification lorsque les modèles pour décrire la structure et le chargement mécanique sont satisfaisants.

En collaboration avec F. Kanoufi du Laboratoire Environnement et Chimie Analytique de l'ESPCI (LECA) nous avons aussi appliqué notre dispositif d'imagerie à l'étude du couplage électro-élastique à l'interface métal-électrolyte (le film d'or recouvrant les microleviers constitue l'électrode de travail dont le potentiel est contrôlé par rapport à une électrode de référence) en restant dans la région de potentiel de double-couche. Dans ce cas le champ de phase optique obtenu résulte à la fois des déformations de la poutre et de l'état électrochimique local de sa surface. Nous avons exploité alors cette double nature de la phase mesurée pour identifier la distribution de densité surfacique de charges et son couplage avec l'effet mécanique observé.

#### **1.2.4 Micro et nanothermique**

Une approche originale pour sonder la matière de manière non invasive est la création "d'ondes thermiques" à l'aide de faisceaux lumineux modulés en amplitude. Ces

ondes sont très sensibles à toute discontinuité thermique et il est ainsi possible de caractériser des couches de quelques dizaines de nanomètres et de mettre en évidence des couches de quelques dizaines de nanomètres ou des résistances d'interface. Les montages à détection optique (montage mirage, microscope photothermique) ont été développés au laboratoire. Ils travaillent sur une gamme de fréquence allant de quelques dizaines de Hertz à quelques dizaines de Mégahertz, ce qui autorise une exploration en profondeur variant sur plus de 3 ordres de grandeurs. Notre expertise dans ce domaine nous a conduit à un partenariat dans l'ANR DIATHERM. Plus récemment nous avons été sollicités par le LPN pour l'optimisation des couches intervenant dans les miroirs de Bragg. Le développement de nano objets et de nano composants peut être limité par le manque de connaissances précises des propriétés thermiques des matériaux déposés en couche minces et/ou de dimensions réduites inférieures au libre parcours moyen. Enfin, le développement d'un système de détection de nanoobjets métalliques chauffés par laser, démarré il y a un an, donne ses premiers résultats. Afin de répondre à ces besoins, nous nous sommes efforcés d'une part d'améliorer les performances des montages expérimentaux et d'autre part de développer de nouvelles méthodes d'exploitation des résultats.

#### 1.2.4.1 Conductivité thermique de structures SOI

*D. Fournier, J.-P. Roger, V. Reita, E. Sepulveda, G. Tessier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [125]

Communications sans actes : [600, 518]

Information et culture scientifique et technique : [650]

Valorisation : [666]

Collaborations : Philippe Bergonzo et Samuel Saada - CEA-LIST (coordonnateur), Hubert Moriceau - LETI, Robert Langer - Picogiga (SOITEC group), Razvigor Ossikovski - LPICM (Ecole Polytechnique), Dominique Ballutaud - GEMAC (CNRS Meudon)),

Une collaboration avec la société SOITEC a débouché à notre participation à l'ANR PNANO " DIATHERM " (2005-2009, autres partenaires : CEA-LIST (coordonnateur), LETI, Picogiga (SOITEC group), LPICM (Ecole Polytechnique), GEMAC (CNRS Meudon)).

La maîtrise de la dissipation thermique des dispositifs nanoélectroniques constitue en effet un des enjeux de l'amélioration de leurs performances. Dans le cadre de substrats innovants de type SOI, qui incorporent une couche enterrée de  $SiO_2$  (isolation électrique et assemblage), l'utilisation d'un matériau de conductivité thermique élevée permet de traiter le problème du refroidissement directement au voisinage des éléments chauds. Le diamant présente une conductivité thermique de trois ordres de grandeur supérieure à celle du  $SiO_2$ . Il s'agira de démontrer la faisabilité de substrats innovants de type SOD (silicon on diamond), où le dépôt de diamant remplace la couche de silice. Notre rôle est la caractérisation thermique de couches de diamant qui seront élaborées au cours du projet à l'aide de notre montage de microscopie de photoréflexance.

#### 1.2.4.2 Semi-conducteurs : silicium épitaxié

*C. Christofides, D. Fournier, N. Haddad, T. Ikari, V. Reita, JP. Roger*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [147]

Conférences invitées : [346, 348, 345]

Communications avec actes : [467]

Communications sans actes : [562]

Collaborations : T. Ikari - University of Miyazaki, Japan, C. Christofides - Université de Chypre

Dans le cas d'interfaces entre deux couches épitaxiées ou une couche épitaxiée déposée sur un substrat de semi-conducteur, nous allons chercher à évaluer les qualités thermique et de recombinaison de l'interface. L'illumination de la surface du semi-conducteur par un faisceau lumineux d'intensité modulée dont l'énergie est supérieure à la bande interdite, est à l'origine de deux ondes (onde thermique et onde de plasma) qui peuvent servir de sonde de l'interface. La mesure s'effectue en surface du semi-conducteur à l'aide d'un faisceau sonde dont la réflexion est sensible à la fois aux porteurs et à la chaleur qui diffusent dans les structures. Nous avons étudié par exemple, l'interface  $SiO_2/Si$  avant et après etching, la qualité recombinante ayant été évaluée grâce à la vitesse de recombinaison à l'interface. Nous espérons conforter ces résultats en enrichissant l'approche expérimentale : en jouant sur les longueurs d'onde du faisceau pompe (ce qui modifie le rapport porteurs photocréés/chaleur) et du faisceau sonde (qui joue sur les facteurs  $dR/dN$  et  $dR/dT$ ) il est en effet possible de privilégier les ondes thermiques ou les ondes plasma se propageant dans le matériau et donc de sonder avec une efficacité plus grande l'interface. Un nouveau microscope à photorélectance a été réalisé dont le faisceau pompe est un laser krypton et le faisceau sonde une diode laser bleue à  $405nm$ .

#### 1.2.4.3 Déterminations découplées de la diffusivité et de la conductivité thermiques d'une couche mince

*D. Fournier, C. Frétygny, J.-P. Roger*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [125, 239]

Conférences invitées : [343]

Communications avec actes : [472, 473, 458]

Communications sans actes : [528, 553]

Collaborations : C. Frétygny - Laboratoire Physicochimie des Polymères et Milieux Dispersés de l'ESPCI (PPMD)

Nous menons une nouvelle approche analytique pour une meilleure exploitation des mesures de microscopie de photorélectance. Grâce à une collaboration avec C. Frétygny (LPPMD) nous avons démontré qu'il était possible de déterminer de manière indépendante la conductivité et la diffusivité thermiques d'une couche mince déposée sur un

matériau présentant des propriétés thermiques différentes. L'étude du comportement asymptotique de la température de surface de l'échantillon montre que dans le cas d'une couche conductrice déposée sur un isolant, la phase et le logarithme de l'amplitude présentent deux pentes différentes. A partir des expressions de celles-ci, on peut extraire  $D$  et  $k$  sans aucune contrainte sur leur rapport. En utilisant simultanément les données obtenues à partir d'expériences effectuées à plusieurs fréquences, il est possible d'obtenir avec un bon rapport signal sur bruit,  $D$  et  $k$  pour la couche métallique et en plus d'établir la présence et d'estimer la valeur d'une résistance d'interface.

Nous avons validé notre méthode sur des échantillons modèles (or sur silice, palladium sur verre, aluminium sur silice . . .) et voulons maintenant étudier soit des empilements de couches très fines soit de structures présentant des résistances d'interfaces que l'on cherchera à analyser. Ces études sont le premier pas vers une modélisation physique réaliste des phénomènes de transport à petite échelle. Pour cela nous travaillerons à dépasser le concept phénoménologique de "résistance d'interface", par une prise en compte des effets physiques aux échelles où le libre parcours moyen est supérieur aux dimensions mises en jeu. Notre participation au GDR CNRS n°2503 Micro et Nanothermique nous permet de confronter nos approches expérimentales aux modélisations.

#### **1.2.4.4 Détection et spectroscopie de nano objets métalliques**

*E. Absil, M. Atlan, D. Fournier, G. Tessier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [52]

Communications avec actes : [417]

Communications sans actes : [504, 503, 502]

Collaborations : Michel Gross - LKB, Paris, Maïté Coppey - Moisan - Institut Jacques Monod, Paris

Depuis 2006, et dans le cadre de l'ANR 3DNanoBioCell, nous développons un système d'imagerie de nano objets métalliques permettant l'utilisation d'une illumination cohérente et/ou incohérente. Sous éclairage blanc, nous avons développé un montage permettant d'imager des particules et d'en obtenir un spectre bien résolu jusqu'à des diamètres de  $30nm$ . En utilisant un chauffage laser, il est possible de créer une sphère chaude autour du nanoobjet de manière à imager des sphères d'or aussi petites que  $10nm$ . Enfin, un système tirant parti de la sensibilité et de la résolution spatiale de l'holographie numérique hétérodyne, avec ou sans chauffage laser externe, est en cours de développement.

#### **1.2.4.5 Dilatation thermique et fusion de nanoparticules métalliques**

*S. Grésillon*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [202, 201, 200]



Collaborations : Anton Plech - Fachbereich Physik der Universitat Konstanz, Constance (Allemagne), Gero von Plessen - Physikalische Institut, Aix la Chapelle (Allemagne)

En collaboration avec A. Plech et G. Von Plessen, nous avons utilisé la diffraction de rayons X et l'équipement de l'ESRF pour suivre la dynamique cristalline de nanoparticules métalliques excitées par un faisceau laser visible. Nous avons pu mesurer ainsi la température atteinte par la particule et le taux de transfert de chaleur de la particule métallique vers la matrice vitreuse. A faible puissance excitatrice, l'échauffement et la dilatation initiaux du réseau sont suivis par un refroidissement en quelques nanosecondes. L'expansion du réseau sous excitation laser augmente linéairement avec la puissance du laser. Lorsque le réseau cristallin atteint des températures encore très inférieures à la température de fusion  $T_f$  des particules, l'ordre cristallin à longue portée disparaît pendant l'excitation laser et réapparaît après quelques nanosecondes. Pour des puissances laser encore supérieures, la fusion complète de la nanoparticule apparaît en moins de 100ps. Ces études prouvent que le désordre cristallin apparaît avant la fusion de la nanoparticule métallique, ce qui n'avait jamais été observé auparavant sur des objets de cette taille.

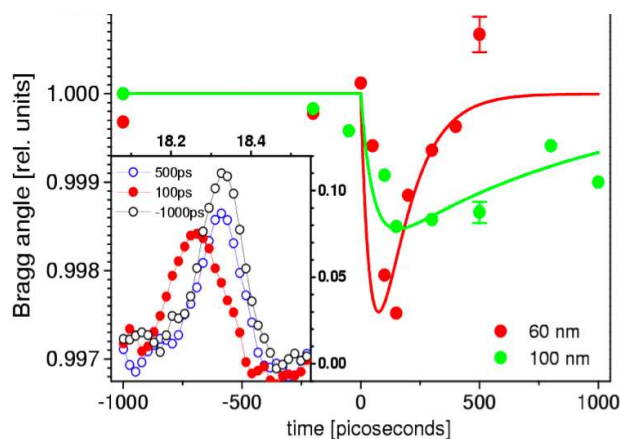


FIG. 1.4: Déplacement du pic de Bragg en fonction du délai temporel entre le laser excitateur et les rayons X. La décroissance de l'impulsion est directement associée au transfert de chaleur vers la matrice vitreuse. Les courbes en bas à gauche sont les profils du pic de Bragg pour différents délais temporels

Nous souhaitons donner suite à ce travail afin comprendre plus précisément la différence entre la fusion de la particule et la disparition de la structure cristalline.

## 1.3 Nanostructures et nanomatériaux

### 1.3.1 Synthèse et caractérisation de quantum dots

*B. Dubertret, B. Mahler, O. Carion, T. Pons, S. Sasnouski, A. Fragola, S. Ithurria, C. Allen*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [36, 37, 57, 96, 106, 105, 112]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [259, 258, 257]

Conférences invitées : [267, 331, 332, 333, 334, 324, 325, 326, 326, 327, 328, 329, 330, 335, 321, 322, 323, 318, 319, 320]

Valorisation : [660, 661, 658, 659, 655, 656, 657]

Collaborations académiques actuelles : UMR 7615, Physico-chimie des polymères et des milieux dispersés (Université Pierre et Marie Curie). N. Lequeux : "Encapsulation dans des matrices de polymères.", URA CNRS 2582, Unité d'Analyse d'Images Quantitative J.-C. Olivo-Marin : "Analyse d'images de fluorescence", UMR CNRS 6120, Polymères, Colloïdes, Interfaces, Université du Maine C. Chassenieux : "Encapsulation des QD dans des particules de latex", Service de Marquage Moléculaire et de Chimie Bio organique CEA/Saclay C. Mioskowsky et E. Doris : "synthèse de ligands à façon pour les quantum dots", UMR 7610, Laboratoire de Chimie Macromoléculaire (Université Pierre et Marie Curie) B. Charleux : "encapsulation de quantum dots dans des mini émulsions de latex", Pierre Charneau, Institut Pasteur, Virologie Moléculaire et Vectorologie 25-28 rue du Dr Roux, 75724 Paris Cedex 15, Jean-Pierre Hermier, Groupe d'étude de la Matière Condensée, CNRS UMR8635, Université de Versailles Saint Quentin, 45 avenue des Etats-Unis, 78035 Versailles Cedex, Nicolas Mezailles, Laboratoire "Hétéroéléments et Coordination" UMR CNRS 7653, Département de Chimie, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, FRANCE, Centre de Recherche Université Laval Robert-Giffard (Canada) P. de Koninck : "Etude de la plasticité neuronale avec des quantum dots", Université Mc Gill, Département de Physique et de Chimie (Canada) P. Wiseman : "Imagerie des QD dans les neurones par Spectroscopie de Corrélation de Fluorescence", Philippe Guyot-Sionnest, James Franck Institute, The University of Chicago, Chicago, Illinois 60637 U.S.A.

Collaborations industrielles actuelles : Mauna Kea Technologies, Genewave

Nous développons des synthèses originales de QD avec des coques multiples (ex :  $CdSe/CdS$  /  $CdZnS/ZnS$ ) avec un contrôle de la structure cristalline, de la forme et de la taille des QDs. Pour la première fois, nous avons montré que nous pouvions contrôler à la fois la structure cristalline du cœur mais également celle de la coque. Cet excellent contrôle de la synthèse des QDs II-VI nous a permis de mieux comprendre les mécanismes de synthèse des QD (au mécanistique) et de mettre au point pour la première fois des QD qui ne clignotent plus sur des durées d'observations extrêmement longues (de l'ordre de l'heure). Jusqu'à présent toutes les observations de molécules fluorescentes uniques ont mis en évidence une émission saccadée avec des temps brillants et des temps noirs. De plus, la statistique des temps noirs obéit à une loi apparemment très générale (Loi de Lévy) sur tous les systèmes observés jusqu'à présent. Les QDs que nous avons synthétisés clignotent beaucoup moins (deux ordres de grandeurs) que les QD qui étaient présentés comme "non clignotant" auparavant. De plus, leur statistique de clignotement dévie fortement de ce qui était observé jusqu'à présent. Pour la première fois, nous observons une statistique qui dévie fortement d'une loi de Lévy : nous avons

un système ergodique. (manuscript soumis)

Sur un autre front, nous avons développé un senseur de pression permettant de jauger la pression radiale dans la coque de QDs de type cœur/coquilles avec une grande précision. L'idée est de synthétiser des QD *CdS/ZnS* cœur/coquille en déposant le *ZnS* monocouche par monocouche. Entre deux monocouches choisies, nous déposons quelques atomes de manganèse. Nous arrivons à déposer 7 couches de *ZnS* sur des QD de *3nm* de diamètre en *CdS*. Nous avons observé que le maximum d'émission du manganèse évoluait entre *580nm* et *635nm* en fonction de la position du manganèse dans la coque. A l'aide d'un modèle newtonien sans paramètres ajustables, nous avons pu montrer que la variation d'émission du manganèse était due à la pression dans la coque du QD. Cette pression, qui peut atteindre *5GPa* est due aux différences de paramètre de maille entre le *CdS* et le *ZnS*. Pour la première fois, nous pouvons mesurer la pression radiale dans des objets de moins de *10nm* avec une résolution de quelques angströms dans la position. (manuscript soumis)

Nous avons également réalisé des billes de silices recouvertes de QD de différentes couleurs. Nous avons montré que nous pouvions associer un code barre optique à l'émission d'une bille. Nous avons quantifié l'émission de chaque bille en fonction des QD déposés sur sa surface. Nous avons également mis au point une méthode permettant le dépôt de QD sur n'importe quelle bille magnétique ou autre. (Advanced Materials, à paraître)

Nous avons mis en évidence une méthode universelle d'échange de ligands sur des QDs. Cette méthode permet théoriquement d'accrocher n'importe quel ligand à la surface des QD. (JACS, à paraître)

Nous avons participé à l'élaboration et la conceptualisation de vésicules fluorescentes et magnétiques qui peuvent être utilisés comme agents de contraste *in vivo*. (Angewandte Chemie, A paraître)

Enfin, nous avons montré que les QD que nous rendons solubles dans l'eau à l'aide d'une encapsulation en micelle de phospholipide pouvaient être greffés facilement à du fluor radioactif (F18) réalisant ainsi une sonde multifonctionnelle. L'imagerie de cette sonde dans la souris à la fois en PET (Positron Emission Tomography) et en fluorescence a permis de montrer pour la première fois que nos QD n'étaient pas retenus dans les organes de l'animal dans lequel ils étaient injectés. Ils sont excrétés soit par la vessie soit par les intestins. Ces résultats contrastent fortement avec les résultats obtenus jusqu'à maintenant avec les QD commerciaux ou avec les QD ayant d'autre chimie de surface. Ils permettent de s'affranchir en grande partie des problèmes de toxicité des QD *in vivo* et ouvre la voie à l'utilisation de ces marqueurs pour l'imagerie et le diagnostic *in vivo*. (Manuscript soumis).

### 1.3.2 Nanojonctions Josephson à Haute Tc

*N. Bergeal, M. Sirena, J. Lesueur, G. Faini, M. Aprili, J.P. Contour, T. Kontos, R. Bernard, J. Briatico*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [70, 72, 74, 73, 143, 157, 170, 225, 224]

Conférences invitées : [375, 376, 366, 367, 374, 370, 371, 372, 377, 373, 378, 369, 380, 381, 379]

Communications avec actes : [477]

Communications sans actes : [517, 585, 586]

Valorisation : [665]

Collaborations : Laboratoire de Photonique et Nanostructures (Marcoussis), Unité mixte de Physique Thales-CNRS (Palaiseau), Société "Starcryoelectronics" (Santa Fe - USA), Centre de Spectroscopie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse (Orsay), Laboratoire des Applications Hyperfréquences (Chambery), Laboratoire National d'Essai (Trappes)

Les Supraconducteurs à Haute  $T_c$  (SHTc) ont des applications potentielles très importantes dans le domaine de l'électronique cryogénique, qu'il s'agisse des capteurs ultrasensibles (SQUID pour la magnétométrie, détecteurs  $THz$  ou IR à un photon), des systèmes de calcul rapides (convertisseurs AD, processeurs) ou d'éléments métrologiques (standard du Volt, triangle quantique). La Jonction Josephson (JJ) est la brique de base nécessaire à la réalisation de ces dispositifs, analogue au transistor dans le monde des semi-conducteurs. Nous avons réussi à fabriquer des JJ à base du supraconducteur  $YBa_2Cu_3O_7$  (YBCO) extrêmement reproductibles, présentant des caractéristiques (résistance normale  $R_n$ , courant critique  $I_c$ , densité de courant ...) adaptées à la plupart des applications, et en utilisant une technologie qui rend la conception des circuits aisée et leur implémentation compatible avec les procédés standard de fabrication de micro-circuits. Nous avons focalisé notre recherche sur la réalisation de JJ, l'optimisation de leurs caractéristiques et leur validation pour des dispositifs élémentaires. Nous avons également étudié leurs propriétés fondamentales, en particulier l'effet de proximité supraconducteur dont elles sont le siège.

Le principe de réalisation des jonctions repose sur le fait que le désordre abaisse la température critique  $T_c$  des SHTc et augmente leur résistivité pour une faible concentration de défauts, puis les rend isolants à forte dose. En irradiant sélectivement certaines zones d'un film mince ( $150nm$ ) du composé YBCO avec des ions oxygène de  $100keV$  environ, nous délimitons des microponts supraconducteurs de largeur typique 1 à  $5\mu m$  (pour une dose de quelques  $10^{15}ions/cm^2$ ). La protection est réalisée par une couche d'or suffisamment épaisse pour stopper les ions, enlevée par la suite par IBE. Dans un deuxième temps, une résine photosensible est déposée sur l'échantillon et une fente de  $20nm$  de large délimitée par masquage électronique est dessinée en travers des ponts, puis ouverte. Une irradiation à faible dose (quelques  $10^{13}ions/cm^2$ ) abaisse localement la  $T_c$  originale, qui devient  $T_c'$ . Pour  $T_c' < T < T_c$ , un couplage Josephson peut s'établir entre les deux réservoirs supra-conducteurs à une température  $T_J$ , qui dépend essentiellement de la dose d'irradiation, et peut donc être ajustée précisément.

Les caractéristiques Josephson sont excellentes. Les JJ suivent un comportement

non-hystérétique RSJ standard pour  $T > T_c'$ . En dessous, un régime flux-flow est observé quand la partie irradiée devient elle-même supraconductrice. Le courant critique dépend quadratiquement de la température selon le modèle de De Gennes Wertamer : les densités (quelques  $10kA/cm^2$ ), et les produits  $I_c R_n$  (quelques  $100\mu eV$ ) sont bien adaptés aux applications RSFQ. Des marches de Shapiro sont observées sous irradiation micro-ondes, et leur modulation en fonction de la puissance est en accord quantitatif avec les prédictions théoriques BCS. La modulation du courant critique en fonction du champ magnétique suit une loi en sinus cardinal, indiquant une très bonne homogénéité de la distribution de courant. L'ensemble de ces observations rend ces jonctions très attractives pour les applications. Nous avons ainsi réalisé des micro-SQUIDS performants : un brevet est en cours de dépôt aux Etats-Unis, et nous travaillons avec la société Star-Cryoelectronics pour la commercialisation. Une bascule flip-flop en logique RSFQ est en cours de test avec les laboratoires CNRS-Thales. Des détecteurs  $THz$  et des réseaux de jonctions pour le standard du Volt sont en cours de développement.

Nous avons amélioré la reproductibilité des caractéristiques Josephson en étudiant systématiquement grâce à des simulations numériques et des expériences complémentaires, le rôle de différents paramètres comme la dispersion dans la taille des fentes, l'énergie des ions incidents, l'épaisseur des couches, le recuit à basse température ( $80^\circ C$ ) . . . La dispersion dans les produits  $I_c R_n$  est de l'ordre de 10 à 15 pour 100, quelque soit la température de fonctionnement. Nous avons également développé une technologie "tri-couche", qui permet en particulier de fabriquer facilement un plan de masse sous les jonctions, ce qui est capital pour les applications hautes fréquences.

Enfin, nous avons développé un modèle quasi-classique pour rendre compte quantitativement du comportement de ces JJ, en particulier la température de transition TJ. Nous avons utilisé les équations diffusives d'Usadel<sup>2</sup>, qui décrivent le transport des quasi-particules et des paires de Cooper dans des systèmes inhomogènes, et ajouté un terme de dépairage, directement issu de la physique des SHTc : les défauts créés par irradiation agissent comme des centres de dépairage dans ces supraconducteurs "ondes-d". La donnée du profil de défauts dans la couche et de l'évolution de la résistivité avec la température et le désordre, nous permettent de calculer en tout point de la structure et à toute température le paramètre d'ordre supraconducteur, et par voie de conséquence TJ.

### **1.3.3 Nanostructures semi-conductrices et ferroélectriques : microscopie électronique en transmission**

#### **1.3.3.1 Activité électrique locale et nanoanalyse de champs électriques de diodes IMPATT et Schottky**

*C. Cabanel, D. Brouri, J.Y. Laval*

articles dans des revues avec comité de lecture : [92]

Collaborations : A. de Lustrac, Institut d'Electronique Fondamentale, Université Paris XI, F. Bouillaut, Laboratoire de Génie Electrique de Paris, SUPELEC

Nous avons développé la technique STEBIC (Scanning Transmission Electron Beam Induced Current) qui permet d'étudier l'activité électrique des jonctions et des défauts, par mesure in situ du courant induit par le faisceau électronique du microscope sur une diode amincie. L'analyse des jonctions en section transverse (X-STEBIC), nous a permis de réaliser des images électriques des jonctions à 2 dimensions avec une résolution latérale de quelques dizaines de nanomètres.

De plus nous pouvons étudier la réponse des champs électriques des diodes sous différentes polarisations et aussi à basse température. Cependant, le signal STEBIC résulte des différents phénomènes physiques liés aux transports des porteurs de charges dans l'échantillon. Il est donc indispensable de simuler les profils STEBIC pour obtenir une interprétation quantitative. Nous avons réalisé des simulations du signal X-STEBIC en adaptant un modèle de dérive/diffusion existant pour la technique EBIC. Le nombre de paramètres ajustables est réduit aux paramètres liés aux recombinaisons afin de faciliter l'interprétation physique.

La compréhension et les mesures de ces différents phénomènes, nous permettent de déterminer les conditions expérimentales dans les quelles nous devons nous placer pour obtenir une image du champ électrique de la diode directement interprétable.

Multicouches *SiGe*

Collaborations : D. Bouchier, V. Yam, Institut d'Electronique Fondamentale, Université Paris XI

Dans le cadre de l'action concertée ACNN "Contraintes", nous avons entrepris l'étude par microscopie électronique à haute résolution et nanoanalyse-X, d'hétérostructures Si-Ge multicouches élaborées par UHV-CVD par l'I.E.F (Orsay), dans le but de mesurer la forme, la taille et la composition chimique des îlots et les contraintes créées par leur épitaxie.

Une importante interdiffusion du Ge et du Si est mise en évidence, par nanoanalyse X, dans tous les échantillons observés. La composition de Ge chute à 30 ou 40 pour cent dans la plupart des îlots. Des relevés de composition en Ge dans les couches d'espacement ont été établis. Les déformations à l'échelle atomique liées à l'interdiffusion ont été mesurées très précisément en haute résolution. La présence de Ge dans les intercouches de Si est plus importante à l'aplomb des sommets des îlots, ce qui entraîne des contraintes verticales.

Ces travaux réalisés en collaboration avec différents laboratoires universitaires ou industriels apportent des informations entièrement nouvelles et indispensables sur le rôle des contraintes et des hétérogénéités chimiques sur les propriétés électroniques des nanostructures et nanodispositifs Si-Ge.

### **1.3.3.2 Couches minces ferroélectriques de niobates ( $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ et $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_2/3\text{O}_3$ )**

*J.Y. Laval, P. Bassoul, C. Cabanel*

Conférences invitées : [357, 358]

Communications sans actes : [546]

Valorisation : [664]

Collaborations : M. Guilloux-Viry, LCSIM, Université de Rennes 1, M. Detalle, D. Re-miens, IEMN-DOAE-MIMM, Université des Sciences et Techniques de Lille, Laboratoire de chimie du solide et inorganique moléculaires, UMR6511CNRS, Université de Rennes 1, F.R. Ladan, Département de Physique, ENS Paris, CRM CN UPR 7251 CNRS, Faculté des Sciences de Marseille-Luminy, E. Cattan, UMR 8620 CNRS, IEMN Villeneuve d'Ascq.

La mise au point de matériaux ferroélectriques et piézoélectriques à l'échelle nanomé-trique nécessite le développement de compétences pluridisciplinaires mises en commun dans le cadre de l'ACI "Nanosciences". Notre opération porte sur les couches minces de niobates ferroélectriques, matériaux développés depuis quelques années, en raison de leurs applications, notamment comme condensateurs miniaturisés, détecteurs py-roélectriques ou actionneurs piezoélectriques. La réalisation de sections transverses et leur étude par les techniques de microscopie en transmission et d'analyse EDS ont per-mis de caractériser ces couches minces à l'échelle nanométrique





## 2 Electrons en interaction

Le concept de "liquide de Fermi", formulé par Landau dans les années 50, a fourni une base solide à la théorie des bandes, bien qu'elle néglige la répulsion électronique. Justement, l'effet des corrélations fortes entre les fermions montre les limites de la théorie de Landau. Un cas notable de l'échec de cette théorie suite à l'intensité de la répulsion coulombienne est l'isolant de Mott. En effet, selon la théorie de Mott-Hubbard pour une bande à demi-remplie, on a un isolant avec un ordre antiferromagnétique à la place d'un métal. Nous avons alors l'émergence d'un métal étrange, où les échelles d'énergie pertinentes sont multiples.

La supraconductivité aux températures inégalées dans les cuprates, la magnétorésistance colossale dans les manganites, le pouvoir thermoélectrique géant dans les cobaltites, les fluctuations et phases cachés dans les Fermions lourds témoignent qu'au-delà de l'enjeu fondamental, les isolants de Mott dopés et les corrélations électroniques fortes présentent un intérêt évident.

Les activités du laboratoire prennent en compte les divers aspects des systèmes fermioniques fortement corrélés. Et cela sans oublier des systèmes plus classiques où une approche nouvelle de l'étude de leurs propriétés nous a permis de trouver une "nouvelle physique" dans des "anciens matériaux".

### 2.1 Etudes thermoélectriques de systèmes électroniques non conventionnels

#### 2.1.1 Limites de validité de la loi Wiedemann-Franz dans les cuprates

*R. Bel, K. Behnia*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [192, 69, 68, 244, 208, 223]

Conférences invitées : [282, 278]

Communications avec actes : [445]

Collaborations : C. Proust (LNCMP Toulouse), D. Maud (LCMI Grenoble)

Un sujet central de la recherche sur les cuprates concerne la validité de la notion de quasi-particule dans la phase normale dans la limite  $T = 0$ . Une façon d'explorer cette question est d'effectuer des mesures de transport de charge et de chaleur à très basses températures pour vérifier la validité ou la violation de la loi Wiedemann-Franz. Cette loi est une signature robuste des liquides de Fermi. Or, la phase normale des cuprates est difficilement accessible à  $T = 0$ . Nous avons conçu et réalisé une expérience de

mesure de conductivité thermique aux conditions extrêmes qui a confirmé la validité de la loi Wiedemann-Franz dans la limite surdopée et qui a également détecté une déviation, supérieure à notre résolution expérimentale dans le régime sous-dopé à l'approche de la transition métal-isolant.

## 2.1.2 La criticalité quantique et ses signatures thermoélectriques

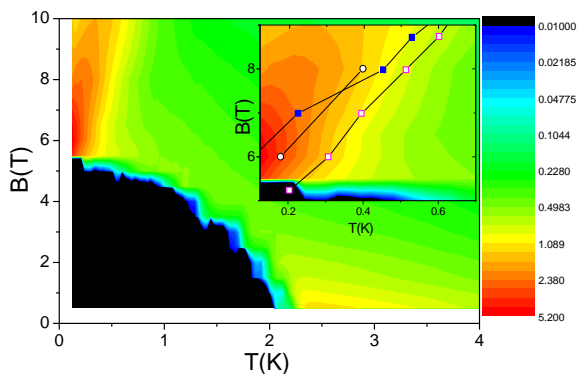
*R. Bel, K. Behnia*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [66, 148]

Conférences invitées : [279, 280]

Collaborations : J. Flouquet, K. Izawa (CEA Grenoble)

Quand la variation d'un paramètre tel la pression ou le champ magnétique modifie l'état fondamental d'un système, une transition de phase à température nulle aura lieu. Une telle transition de phase quantique a attiré beaucoup d'attention ces dernières années. Théoriquement, on attend que la théorie standard des métaux (la théorie dite de liquide Fermi) s'effondre au voisinage d'un point quantique critique, celui qui sépare les deux phases voisines à  $T = 0$ . Un exemple, intensivement documenté, est le point quantique critique induit par le champ magnétique de CeCoIn<sub>5</sub>. C'est un supraconducteur à Fermions lourds ( $T_c = 2.2$  K) dont les propriétés de transport écartent considérablement de celles d'un liquide de Fermi. Au cours de la thèse de Romain Bel, notre groupe a montré que ce système présente un effet Nernst anormalement élevé. Par suite, dans une collaboration avec l'équipe de Jacques Flouquet (postdoc de Kochi Izawa), nous avons pu montrer que le signal Nernst diverge au voisinage d'un point quantique critique. Cette dernière étude est la première exploration expérimentale de la réponse thermoélectrique au voisinage d'un point quantique critique.




---

Le point quantique critique de CeCoIn<sub>5</sub> révélé par les mesures d'effet Nernst. La zone noire représente le supraconducteur. Le coefficient Nernst divisé par température passe par une valeur maximale près de  $H_{c2}(0)$ [148].

---

## 2.1.3 Fluctuations dans les supraconducteurs amorphes

*H. Aubin, K. Behnia, J. Lesueur*

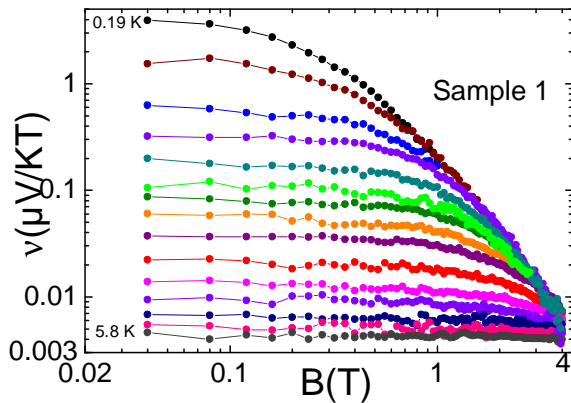
Articles dans des revues avec comité de lecture : [94, 61, 93, 54, 205, 206]

Conférences invitées : [285, 275, 396, 274]

Communications avec actes : [444]

La compréhension de l'origine des fluctuations supraconductrices et l'identification de leurs manifestations expérimentales constitue toujours un enjeu important dans le domaine. D'une part, en raison de la nature toujours controversée de la phase normale sous-dopée des cuprates - laquelle est supposée être le siège de fluctuations supraconductrices dont la nature exacte et l'importance restent encore à déterminer. D'autre part, en raison de la possibilité à pouvoir étudier des systèmes présentant des fluctuations supraconductrices quantiques. En effet, les transitions de phases quantiques sont l'un des axes majeurs de recherche dans le domaine des électrons fortement corrélés. Une collaboration avec le groupe du L. Dumoulin (CSNSM-Orsay), dans le cadre de la thèse de C. Marrache-Kikuchi, nous a permis d'accéder à des échantillons supraconducteurs amorphes de  $Nb_xSi_{1-x}$ . Via des mesures de résistance électrique, nous avons découvert une transition de phase quantique induite par le champ magnétique dans ce système et ainsi pu étudier un exemple rare de comportement critique quantique.

Motivé par ces résultats, et grâce à l'expertise du groupe mené par K. Behnia dans les mesures de coefficients thermoélectriques, nous avons étudié en détail l'effet des fluctuations supraconductrices sur le signal Nernst dans ce système. Dans le cadre du travail de thèse de A. Pourret, nous avons pu identifier le signal Nernst généré par les fluctuations de paires de Cooper - décrites théoriquement par les fluctuations d'un champ dans l'approximation Gaussienne. Ces résultats ont permis de valider une théorie récente de I. Ussishskin, S. Sondhi, D. Huse, prédisant l'évolution du coefficient Nernst en fonction de la longueur de corrélation supraconductrice. Ce résultat sans ambiguïté est remarquable dans le climat actuel de controverse autour de l'identification du signal Nernst observé dans la phase sous-dopée des cuprates.




---

Évolution du coefficient Nernst pour un échantillon amorphe de  $Nb_{0.15}Si_{0.85}$  ( $T_c = 0.165$  K) avec le champ magnétique, pour différentes températures (0.19 - 5.8 K)..

---

Plus récemment, dans le cadre du travail postdoctoral de P. Spathis, nous avons étudié le signal Nernst au voisinage de la transition supraconductrice observée dans le système désordonné InOx, fourni par Z. Ovadyahu (Israël). Ces mesures ont permis d'identifier un régime de fluctuations de phase dans ce système.

## 2.1.4 Les ordres cachés dans les métaux aux électrons lourds

*R. Bel, K. Behnia*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [68, 60, 150, 207, 152, 154]

Conférences invitées : [284, 276]

Collaborations : J. Flouquet (CEA Grenoble), P. Lejay (IN Grenoble), H. Sato (U. Tokyo), Y. Matsuda (U. Kyoto)

Le composé à fermions lourds  $URu_2Si_2$  présente une transition de phase à  $17K$  dont la nature reste un mystère. Malgré la quantité considérable de l'entropie perdue à la transition, le moment d'ordre magnétique de la phase ordonnée est minuscule. Nous avons effectué des mesures de transport thermique et thermoélectriques qui a apporté des nouvelles pièces à ce puzzle. L'analyse de ces résultats nous a conduit à conclure que le mise en ordre est accompagné d'une reconstruction drastique de la surface de Fermi avec la perte de neuf dixièmes des électrons itinérants. La phase dite d'ordre caché est donc un cas (assez rare) d'un semi-métal aux électrons lourds. Plus récemment, dans le cadre de la thèse d'Alexandre Pourret, nous avons également sondé le transport thermique et thermoélectrique du composé skutterudite  $PrFe_4P_{12}$  pour mettre en évidence une reconstruction similaire de la surface de Fermi à la transition de phase qui a lieu à  $6.5K$ . Dans les deux cas, l'identité microscopique du paramètre d'ordre reste inconnue. Dans  $PrFe_4P_{12}$ , elle est sans doute liée aux degrés orbitaux de liberté. Dans  $URu_2Si_2$ , il pourrait s'agir d'une onde de densité inhabituelle. Dans les deux cas, on a affaire à une transition métal-isolant avortée : la surface de Fermi est presque entièrement détruite, mais une petite fraction survit et donc un semi-métal à fermions lourds.

## 2.1.5 L'effet Nernst des semi-métaux et la réfrigération cryogénique

*K. Behnia*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [64]

Que détermine la réponse Nernst d'un liquide de Fermi ? C'est la question posée par l'observation inattendue d'un signal Nernst (par notre groupe, mais aussi par quelques autres) dans divers métaux fortement corrélés. Avant d'associer l'effet Nernst et l'effondrement de liquide de Fermi, il faudrait savoir quel serait son ordre de grandeur dans un liquide de Fermi. Dans un métal simple (le cuivre ou l'or), le coefficient Nernst est très faible et à la limite de détectabilité, mais est-ce que c'est le cas de tout métal se comportant comme un liquide de Fermi ? La réponse est négative. Pour nous éclaircir à ce propos, nous avons retourné au système où l'effet Nernst a été découvert au dix-neuvième siècle par Nernst et Ettingshausen. Il s'agit de l'élément bismuth dont le coefficient Nernst est mille fois supérieur à celui d'YBCO ! La faiblesse de la densité des porteurs et le grand libre parcours moyen des électrons est à l'origine de l'amplitude extrêmement élevé de réponse Nernst dans bismuth. En effet, dans une image simple basée sur l'équation de Boltzmann, la réponse Nernst est proportionnelle à la mobi-

lité électronique et inversement proportionnelle à l'énergie de Fermi. Ceci expliquerait l'ordre de grandeur de l'effet Nernst à basse température de divers métaux étalé sur 8 ordres de grandeur y compris les sémi-métaux à Fermions lourds comme URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> et PrFe<sub>4</sub>F<sub>12</sub> (avec leur faible énergie de Fermi). Ces derniers émergent de notre analyse comme des matériaux prometteurs pour réfrigération Etttingshausen aux températures cryogéniques. C'est parce que contrairement à bismuth et les semi-métaux aux électrons légers, ils peuvent garder leur comportement métallique sous champ magnétique.

### 2.1.6 Bismuth au-delà de la limite quantique

*K. Behnia*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [64, 59]

Collaborations : L. Balicas (Sao Paulo), Y. Kopelevich (Tallahassee Floride)

L'élément bismuth a joué un rôle fascinant dans l'histoire de la physique des métaux. Nombreux phénomènes ont été d'abord observé dans bismuth qui se singularise par le libre parcours moyen très élevé de ses électrons ainsi que leur grande longueur d'onde de Fermi. Par suite de la petitesse de la surface de Fermi (qui n'occupe que  $10^{-5}$  de la zone de Brillouin) on peut atteindre la limite quantique avec un champ magnétique de  $9T$  orienté suivant l'axe trigonal. Au-delà de cette limite, tous les électrons se mettent au premier niveau de Landau. Nous avons effectué la première étude de la thermoélectricité métallique au voisinage d'une telle limite. La réponse thermoélectrique est principalement hors-diagonal et consiste en oscillations quantiques géante du coefficient Nernst. Nos dernières mesures effectuées à Tallahassee jusqu'à  $33T$ , ont détecté des maxima au-delà de la limite quantique et aux facteurs de remplissage fractionnel. L'explication de leur origine reste un défi à la théorie.

## 2.2 Etude des cuprates supraconducteurs

### 2.2.1 Test direct des fluctuations de paires dans un cuprate sous-dopé

*N. Bergeal, J. Lesueur, M. Aprili, B. Leridon*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [71]

Conférences invitées : [369, 370, 371, 372, 375]

Collaborations : G. Faini (LPN Marcoussis), J.P. Contour (Thales-CNRS Palaiseau)

Dans la phase sous dopée des cuprates supraconducteurs, on observe une baisse des excitations de spin et de charge au voisinage du niveau de Fermi pour des températures supérieures à  $T_c$ , mais inférieures à une température  $T^*$  : c'est le régime dit de "pseudo-gap". Nombreux sont ceux qui pensent que cette dépression est due à la formation de paires de Cooper fluctuantes à  $T^*$ , et se condensant à  $T_c$ . Mais jusqu'ici, toutes les sondes expérimentales utilisées n'étaient sensibles qu'aux excitations à une particule. Nous avons développé une expérience originale qui vient sonder directement les

paires électroniques, ou plus exactement leurs fluctuations. Nous avons en fait mesuré la “susceptibilité de paires” en couplant au travers d’une barrière isolante, un supraconducteur en dessous de sa  $T_c$  (analogue du champ exciteur dans une expérience de susceptibilité ordinaire) avec un supraconducteur dans le régime de pseudo-gap dans lequel il n’existe que des fluctuations de paires. Scalapino et Ferrel<sup>1</sup> ont montré qu’un excès de courant est attendu dans une telle jonction, proportionnel à la partie imaginaire de la susceptibilité de paires. Sa dépendance en énergie reflète l’aspect temporel des fluctuations ; celle en champ magnétique leurs caractéristiques spatiales.

Nous avons utilisé une méthode originale pour fabriquer des jonctions pseudo-Josephson” entre un cuprate supraconducteur ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) optimalement dopé (OP) et un cuprate ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Co}_x\text{O}_7$ ) sous-dopé (UD), en utilisant une barrière isolante de  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Ga}_x\text{O}_7$ . Nous avons clairement établi la présence de fluctuations de paires au dessus de la  $T_c$  du composé sous-dopé, mais dans une gamme très restreinte de température (15K) environ, bien en deçà de la température d’ouverture du PG ( $T^* = 250\text{K}$ ). L’analyse semi-quantitative des résultats (dépendance en température, caractéristiques spectrales) montre que nous observons des fluctuations gaussiennes standard<sup>2</sup>. Ces observations sont en contradictions avec les prédictions théoriques de Janko et al<sup>3</sup>, qui avaient proposé cette expérience pour montrer que les paires de Cooper incohérentes expliquent l’apparition du PG. Il semble donc que l’origine de ce dernier ne soit pas directement liée à la supraconductivité.

## 2.2.2 Fluctuations dans les cuprates supraconducteurs

*B. Leridon*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [95, 163, 164, 167]

Conférences invitées : [365]

Communications sans actes : [573, 575, 576, 580, 577]

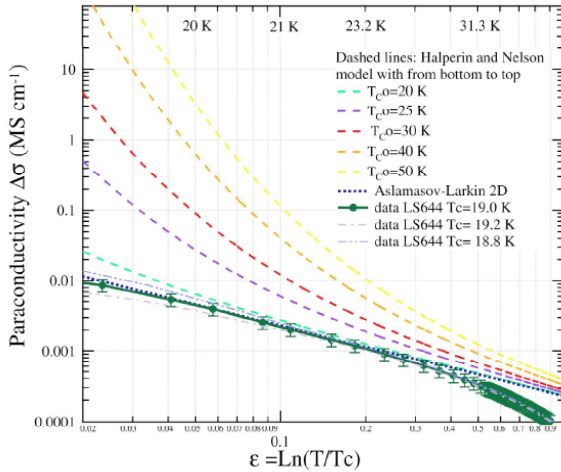
Collaborations : V.V. Moshchalkov, J. Vanacken (U. Louvain), M. Grilli, S. Caprara (U. La Sapienza Rome)

Afin d’étudier le régime des fluctuations supraconductrices d’un cuprate sous-dopé par mesures de transport, une collaboration a été engagée avec l’équipe de V.V. Moshchalkov et J. Vanacken à l’Université de Louvain (Belgique). Dans ce Laboratoire, nous avons réalisé des mesures de transport sous champ magnétique pulsé intense (50T) afin de déterminer la résistivité dans l’état normal de films minces de  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  sous-dopés. Nous avons pu alors calculer la paraconductivité ou conductivité due aux fluctuations  $\sigma - \sigma_N$ .

<sup>1</sup>Scalapino D. J. Phys. Rev. Lett. 24, 1052 (1968) and Ferrel R. A. Low Temp. Phys. 1,423 (1969)

<sup>2</sup>Kadin A. M. and Goldman A. M. Phys. Rev. B 25, 6701 (1982)

<sup>3</sup>Janko B. et al Phys. Rev. Lett. 82,4304 (1999)



Paraconductivité mesurée (en vert) comparée avec la prédiction universelle de AL2D en tirets bleu marine et le modèle de Halperin et Nelson pour différentes valeurs de  $T_{c0}$ . On voit que les fluctuations de phase ne sont possibles que sur une toute petite gamme de température (avec  $T_{c0}$  très peu supérieur à  $T_c$ ).

De manière assez surprenante, nous retrouvons, sans aucun paramètre ajustable des fluctuations gaussiennes de type Aslamazov et Larkin à deux dimensions (AL2D). Ce régime a ceci de remarquable qu'il est universel et la paraconductivité ne dépend que de la température réduite  $\varepsilon = \log(T/T_c)$ .

A plus haute température, nous retrouvons un régime de loi de puissance en  $T$ , déjà observé dans YBCO et BSCCO légèrement sous-dopés.

Ces observations sont incompatibles avec un modèle de paires préformées pour le pseudogap, pour lequel on observerait plutôt des fluctuations de phase de type Halperin et Nelson.

### 2.2.3 Energie cinétique des états Normal et Supraconducteur

*N. Bontemps, R. Lobo*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [77, 78, 102, 217, 218, 219, 216]

Conférences invitées : [303, 304, 305, 306, 400, 401]

Communications avec actes : [447, 487, 488]

Collaboration : A. Santander-Syro (Orsay), G. Deutscher (Tel-Aviv)

Les électrons en interaction faible, dans les métaux conventionnels, sont décrits par la théorie du liquide de Fermi (Landau). La théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer décrit ensuite de façon remarquable la supraconductivité dans ces matériaux. Il y a cependant une prédiction unanimement acceptée, qui semblait invérifiable et qui est au coeur de la condensation de type BCS : à la transition, l'énergie cinétique des électrons augmente, l'énergie potentielle diminue. C'est cette diminution qui l'emporte (de peu!) et est le moteur de la supraconductivité. Expérimentalement, cependant, la variation relative des énergies cinétique et potentielle est excessivement faible, de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-6}$ .

Avec les cuprates supraconducteurs, tout change : ce terme devient de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-2}$ . De plus, l'aire qui sous-tend la conductivité optique associée aux porteurs de charge représente leur énergie cinétique dans l'hypothèse généralement acceptée d'un

modèle de liaisons fortes : cette aire est accessible expérimentalement avec la précision souhaitée à condition de maîtriser les erreurs expérimentales. Donc un nouveau test de la validité de la théorie BCS est possible, et est très important pour les cuprates.

Nous présentons ici la synthèse de nos résultats dans trois échantillons d'un supraconducteur très fréquemment étudié,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  (*Bi* – 2212), et nous sommes les premiers à avoir mené une étude dans une gamme large de dopage, allant jusqu'au matériau sur-dopé. Nous avons trouvé que du côté sur-dopé, l'énergie cinétique augmente, comme le prévoit la théorie BCS, et sa variation a le bon ordre de grandeur.

Au voisinage du dopage optimal, la variation est faible. Par contre, pour le système sous-dopé, l'énergie cinétique diminue, en désaccord avec la théorie BCS (ces derniers résultats avaient aussi été mis en évidence par l'équipe Suisse). Ceci peut évoquer une condensation de Bose-Einstein. Cette hypothèse est intéressante en ce qu'elle rejoint les travaux de nos collègues des atomes froids fermioniques, qui en partant d'un condensat de Bose-Einstein, cherchent à se rapprocher d'une condensation BCS. Certains modèles ont été inspirés de ces résultats. L'ensemble des données en fonction du dopage, en montrant une évolution progressive d'un comportement type BCS à un comportement non BCS impose des contraintes très fortes à toute théorie qui se voudrait unifiée de la supraconductivité à haute température critique.

## 2.2.4 Corrélations électroniques dans les Cuprates

*N. Bontemps, R. Lobo, J. Tomczac, A. Zimmers, A. Santander-Syro*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [181]

Collaboration : A.J. Millis (Columbia University)

L'examen du diagramme de phase des cuprates soulève une question : les composés de type n et ceux de type p sont-ils équivalents? Dans les deux cas, leurs propriétés sont contrôlées par la physique des plans  $\text{CuO}_2$  dopés où sont injectés des porteurs de charge a priori équivalents, des électrons (type n) ou des trous (type p).

Une première réponse à cette question passe par l'évaluation des corrélations électroniques. En l'absence de dopage, on part d'un isolant de Mott dans les deux cas, du fait des fortes corrélations électroniques. Dans les cuprates de type p, les trous sont injectés dans la bande de Hubbard inférieure, perturbant l'isolant de Mott où les trous restent fortement corrélés. On pourrait penser par contre, dans une image un peu simpliste de modèle de bandes, qu'en dopant avec des électrons, on remplit progressivement la bande de Hubbard supérieure, et les électrons injectés sont plus faiblement corrélés. Une mesure de ces corrélations est l'énergie cinétique des porteurs : ceux-ci sont d'autant moins mobiles que les corrélations sont fortes.

Nous avons comparé les propriétés de cuprates dopés trous  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ , où le dopage varie avec la teneur en oxygène  $\delta$  et dopés électrons  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  où la concentration en Ce détermine en principe le dopage. Dans le premier cas, nous avons étudié un échantillon sous-dopé ( $T_c = 70$  K), proche de l'optimum ( $T_c = 80$  K) et sur-



dopé ( $T_c = 63$  K). Dans le deuxième cas, nous avons étudié 4 échantillons :  $x = 0.11$  (qui ne devient pas supraconducteur au-dessus de 4 K),  $x = 0.13$ , sous-dopé ( $T_c = 15$  K), optimal ( $T_c = 21$  K), et sur-dopé ( $T_c = 15$  K). Tous ces échantillons sont des couches minces épitaxiées d'épaisseur typique 300 nm, déposées par pulvérisation cathodique (type p) ou ablation laser (type n) sur substrat de  $\text{SrTiO}_3$ . Nous avons mesuré leur réflectivité dans la gamme 5 meV-2.5 eV. Nous en déduisons la conductivité optique par une procédure bien établie. Le poids spectral c'est-à-dire l'intégrale de la partie réelle de la conductivité, de zéro à une énergie de l'ordre de la largeur de bande (typiquement 1 eV) représente l'énergie cinétique (dans l'hypothèse d'un modèle de liaisons fortes).

Des expériences de photoémission résolue en angle (ARPES) sur le cuprate dopé aux électrons  $\text{Sm}_{1.84}\text{Ce}_{0.16}\text{CuO}_4$  montrent que les interactions à plusieurs particules sont fortement anisotropes. Les échelles d'énergie de ces interactions, ainsi que la dépendance en énergie du taux de diffusion, sont très différents entre la diagonale et le bord de zone. D'autre part, le taux de diffusion des électrons au niveau de Fermi présente une anisotropie non triviale, étant minimum sur la diagonale et maximum non pas aux croisements de la surface de Fermi avec la zone de Brillouin antiferromagnétique (les "hot-spots"), mais a des vecteurs d'onde à mi-chemin entre le bord de zone et ces hot-spots.

## 2.2.5 Conductivité optique des cuprates dopés aux électrons

*R. Lobo, N. Bontemps, R. Schleck, A. Zimmers*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [248, 249, 250, 251, 252, 145]

Communications avec actes : [500, 501]

Collaboration : T. Timusk (McMaster), C.C. Homes (Broohaven), D. Colson (CEA)

L'ouverture d'un gap dans la surface de Fermi devrait se manifester dans la conductivité optique comme un transfert de poids spectral des faibles énergies soit vers des hautes énergies (pseudo-gap) soit vers la réponse dc (gap supra).

Le pseudogap a des signatures variées selon les techniques expérimentales. En spectroscopie infrarouge, il est observé de façon très nette dans les études suivant l'axe c notamment dans  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  sous-dopé. La diminution de poids spectral à faible énergie n'est pas compensée dans tout le domaine d'énergie exploré : ceci suggère que ce poids spectral est repoussé sur une très large gamme, y compris au-delà de celle qui est accessible expérimentalement.

Nous avons analysé la conductivité optique des composés  $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  (PCCO). L'intérêt de ces couches est qu'elles peuvent être, comme dans les types p, à la fois sous-dopée et supraconductrice, ou sur-dopée et également supraconductrice, sans qu'on puisse mettre vraiment en doute leur homogénéité (le traitement sous oxygène -oxydation ou, comme ici, réduction- est plus aisé dans une couche mince).

L'étude du poids spectral en fonction de la température et sur différentes plages de fréquence nous permet de révéler l'ouverture d'un gap partiel sur la surface de Fermi :

nos analyses montrent en effet que de  $x = 0.11$  à  $x = 0.15$ , on peut distinguer simultanément le développement dans la conductivité d'une contribution des charges libres, signature de la présence d'arcs dans la surface de Fermi. Par ailleurs, le transfert de poids spectral des basses vers les hautes énergies en dessous d'une température  $T_w$  atteste de l'ouverture d'un gap qui ne peut donc se développer que dans des directions de vecteur d'onde  $k$  différentes de celles où se situent les charges libres.

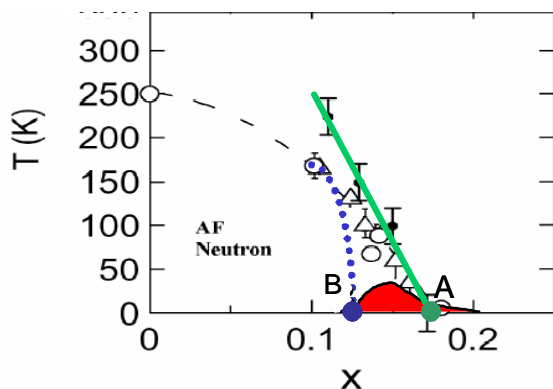


Diagramme de phase des cuprates de type  $n$ . Le dôme rouge représente la phase supraconductrice des couches de PCCO. La ligne en tirets noirs montre l'établissement de l'ordre magnétique vu par les neutrons dans NCCO. La ligne en pointillés bleue représenterait  $T_N$  d'échantillons NCCO cristallins homogènes.

Une explication naturelle celle d'un gap d'onde densité de spin (SDW). L'optique y est sensible dès que les fluctuations de spin sont suffisamment lentes et de portée suffisamment grande pour que le système apparaisse statique au regard de la pulsation optique. Si la température d'apparition de la SDW diminue quand  $x$  augmente et s'annule à un dopage déterminé  $x_0$ , les conditions mentionnées ci-dessus sont satisfaites jusqu'à  $x_0$ . Elles ne peuvent être vérifiées au-delà de cette concentration critique, même s'il subsiste des fluctuations de spin très près de zéro (cachées alors par le dôme supraconducteur). L'optique repère une température de cross-over, qui disparaît autour de la même concentration. Le système présente donc un Point Critique Quantique. Dans la phase supra de PCCO, nous avons mis en évidence l'ouverture d'un gap supraconducteur dont la magnitude suit  $T_c$ . Cette phase supraconductrice co-existe avec la phase du gap dans l'état normal.

Nous menons à présent des mesures les composés Hg-1201 et Bi-2201 afin de chercher ces manifestations de gap et pseudogap dans les cuprates dopés trous.

## 2.2.6 Effet Josephson pour des supraconducteurs brisant la symétrie par renversement du temps et la symétrie d'inversion

*B. Leridon*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [166]

Conférences invitées : [364]

Communications sans actes : [579]

Collaborations : C. M. Varma (U. Riverside), T. K. Ng (Hong Kong)

Parmi les nombreuses signatures spectaculaires de l'effet Josephson, l'une est la dépendance en champ magnétique du courant critique. Cette dépendance est – pour une

jonction petite devant la longueur de Josephson – analogue au diagramme de diffraction de Fraunhofer pour une ouverture dont la forme est celle de la jonction.

En réalité, nous venons de montrer que si l'un des supraconducteurs qui constituent la jonction Josephson brise simultanément la symétrie par renversement du temps et la symétrie centrale, ce diagramme est profondément modifié. En particulier, il n'y a plus de maximum à  $H = 0$ , le courant critique n'est plus symétrique en champ et on n'observe plus de décroissance à fort champ magnétique.

Cette découverte constitue donc une nouvelle signature pour les supraconducteurs de type  $d + ip$  ou  $s + ip$  par exemple. A ce jour, il y a deux applications possibles. D'une part le composé à fermions lourds  $\text{CePt}_3\text{Si}$  qui est antiferromagnétique au-dessous de  $2.2K$  et supraconducteur au-dessous de  $0.75K$  et pour lequel il y a des indications de couplage mixte triplet/singulet. Un groupe Japonais a effectué des mesures de couplage Josephson entre ce composé et de l'aluminium<sup>4</sup>. Un diagramme Josephson "conventionnel" est observé dans la direction  $a$  alors qu'un diagramme du type décrit ci-dessus est observé dans la direction  $c$  où le miroir est perdu.

De la même façon, cet effet pourrait avoir des conséquences pour l'étude de la phase sous-dopée des cuprates supraconducteurs où une telle brisure de symétrie a été mise en évidence par des expériences récentes de neutrons polarisés en spin<sup>5</sup>. Des expériences de couplage Josephson YBCO/Pb réalisées à Orsay avaient mis en évidence un tel effet<sup>6</sup>.

## 2.2.7 Etude locale d'inhomogénéités dans des cuprates supraconducteurs

*A. Trokiner*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [178, 179, 193, 203, 204, 241]

Conférences invitées : [410, 412, 413]

Communications avec actes : [479, 497]

Communications sans actes : [590, 593, 594, 595, 596, 611]

Collaborations : A. Knishnik (Technion, Haïfa), G. Klotzsche (Universität Leipzig)

L'existence d'îlots magnétiques dans la "matrice" supraconductrice a été mise en évidence dans des cuprates sous-dopés, essentiellement par neutrons et  $\mu$ -Sr.

Comprendre l'origine de ce magnétisme statique et son lien avec la supraconductivité est un enjeu fondamental pour approcher la nature de la supraconductivité des cuprates. Cette coexistence favorise-t-elle la formation de l'état supraconducteur ou qui s'y oppose-t-elle? Plusieurs théories s'affrontent. Répondre à ces questions nécessite de savoir si le magnétisme est intrinsèque aux plans  $\text{CuO}_2$  ou bien induit par des défauts et, si il dépend du dopage.

---

<sup>4</sup>Sumiyama et al., J. Phys. Soc. of Japan 74, 3041(2005)

<sup>5</sup>Fauqué et al. PRL 96, 197001 (2006)

<sup>6</sup>X. Grison, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique, 2000

Par RMN de  $^{43}\text{Ca}$ , nous avons caractérisé les îlots magnétiques existant dans la phase supraconductrice de la famille  $(\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Ba}_{1.75-x}\text{La}_{0.25+x})\text{Cu}_3\text{O}_y$  pour différents dopages. Nous avons pu ainsi évaluer la concentration et la taille des îlots ainsi que le moment magnétique des ions cuivre dans ces îlots. Notre étude en fonction du dopage montre que le magnétisme est donc d'autant plus faible que le dopage augmente. Il n'est pas détectable pour le composé au dopage optimal.

Il est encore difficile de dire si le magnétisme est intrinsèque. Si il est induit par les défauts, nous pouvons conclure que ceux-ci sont d'autant plus efficaces à induire le magnétisme que le dopage est faible.

## 2.3 Manganites et nouveaux composés magnétiques

### 2.3.1 Etude du système $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$

*P. Monod, J.Y. Laval, P. Bassoul*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [194, 134, 44, 133]

Collaborations : T. Orlova (St. Petersburg), J. Noudem (ISMRA – Caen), M. Golosovsky (Jerusalem), L. Mechin, P. Perna (ISMRA – Caen), R. Budhani (Kanpur – Inde)

Nous avons substitué le Mn de LCMO (1/3–2/3), en céramique, par Ti, Nb, Cr, Fe, Ni, Cu, Ga, Mg, à des concentrations entre 0.5% et 7%. Les mesures magnétiques (SQUID) et de TEM indiquent que seuls les ions substitués qui sont magnétiques dans LCMO préservent le vecteur d'onde incommensurable de l'Ordre de Charge. D'autre part, nous avons pu mesurer la relation de dispersion des Ondes de Spin Ferromagnétiques sur des films de LSMO (2/3–1/3) par Résonance Electronique et déterminer leur libre parcours moyen en fonction de l'orientation du champ et de la température. L'étude, sans contacts, de la magnétorésistance de ces films à 10GHz permet une description très précise de leur magnétostatique.

### 2.3.2 Propriétés locales des manganites

*A. Trokiner, P. Monod*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [242, 243, 246]

Conférences invitées : [408, 409]

Collaborations : C. Simon (CRISMAT), S. Verkhovskii (Ekaterinburg), A. Yakubovskii, (Moscow), Kumagai (Hokkaido University, Sapporo), S-W. Cheong (State University of New Jersey), D. Khomskii (Universitaet zu Koln)

Les manganites sont des systèmes à électrons corrélés dont le diagramme de phase est encore mal connu. Nous étudions la nature de la phase ordre de charges (CO), la transition métal-isolant ainsi que les inhomogénéités statiques ou dynamiques qui existent près des transitions entre les phases paramagnétique, ferromagnétique (FM) et

antiferromagnétique (AF). Ces études des propriétés locales sont menées essentiellement par RMN du noyau  $^{17}\text{O}$ . Nous avons montré entre autre que, dans  $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$  le modèle ionique rend mieux compte de la phase CO que celui dit du "polaron de Zener". L'étude de la fusion de cette phase en champ magnétique est réalisée en collaboration avec le CRISMAT de Caen qui réalise des mesures d'aimantation.

Nous avons également étudié les composés  $\text{BiCaMnO}_3$  et  $\text{BiSrMnO}_3$  dont les températures d'ordre de charge sont  $T_{CO} = 475\text{K}$  et  $325\text{K}$ , respectivement. Comprendre l'origine de cette valeur élevée, souvent liée au rôle particulier de l'atome Bi, est un enjeu important. Par RMN de  $^{209}\text{Bi}$ , nous avons montré que la diminution de  $T_{CO}$  entre BiSr et BiCa est plus en liaison avec un "canting" des spins de Mn qu'avec un changement des hybridations orbitales de Bi.

## 2.4 Etude des systèmes ferromagnétiques/supraconducteurs

### 2.4.1 Injection de spins dans un supraconducteur conventionnel

*B. Leridon, J. Lesueur, M. Aprili*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [165, 114]

Conférences invitées : [363, 362]

Communications sans actes : [574, 578]

Comment se comporte le paramètre d'ordre (gap) d'un supraconducteur lorsque ses excitations sont polarisées en spin ? Nous avons cherché à répondre à cette question sur un matériau conventionnel (le Nb) d'épaisseur 50 nm, en injectant à partir du permalloy (NiFe). Sur le dessus de la couche de Nb est réalisée une jonction tunnel avec NiFe. Au-dessous, on a réalisé une jonction tunnel avec une contre-électrode en Al afin de mesurer la densité d'état. On a donc un spectromètre in situ qui va nous montrer comment les états électroniques sont modifiés en fonction du taux d'injection de spins. L'effet de l'injection est manifeste car la densité d'états apparaît comme modifiée thermiquement. La même expérience réalisée sur une structure identique, mais où l'injection se fait à partir d'un métal paramagnétique (Ag ou Al par exemple) montre que les quasiparticules ne sont pas échauffées dans ce cas. Nous interprétons ce phénomène comme le fait que dans le cas où les quasiparticules sont polarisées en spin, leur temps de recombinaison se trouve majoré par le temps de relaxation de spin. Si l'on se contentait de considérer le temps de relaxation de spin du Nb "normal", on ne pourrait expliquer l'effet, car il est du même ordre de grandeur que le temps de recombinaison estimé à 1.5K à partir des données de Johnson<sup>7</sup> dans le Nb ( $10^{-9}$  s). Cependant, dans un supraconducteur, un phénomène remarquable se produit. De manière inhérente à la théorie BCS et aux équations de Bogoliubov, spin et charge sont séparés pour les excitations de basse énergie<sup>8</sup>. Par exemple, une quasiparticule à l'énergie du gap possède une charge nulle mais

<sup>7</sup>Johnson, Phys. Rev. Letters 67, 374 (1991)

<sup>8</sup>Kivelson and Rokhsar, Phys. Rev. B 41, 11693 (1990)

un spin  $1/2$ . La charge est entièrement portée par les paires de Cooper. Cet effet modifie considérablement le couplage spin orbite et l'augmentation du temps de relaxation de spin correspondante a été calculée par Yafet<sup>9</sup>. En utilisant cette estimation, on obtient un temps de relaxation de spin de  $10^{-8}$  s, qui permet d'expliquer ces effets de quasiparticules "chaudes". En réalité, nous avons donc réalisé un dispositif de séparation spatiale des excitations de spin et de la charge. L'injection sépare les deux types d'excitations, le spin diffuse ensuite librement au voisinage de la seconde jonction servant de détecteur et la charge est évacuée par le supercourant qui circule dans le supraconducteur. Si les spins injectés sont polarisés, il ne peuvent se recombinaer qu'au bout d'un temps égal au temps de relaxation de spin, ce qui aboutit à une température  $T^* > T$  pour les quasiparticules. Nous avons nommé cet effet "spin bottleneck" par analogie avec le "phonon bottleneck"<sup>10</sup>.

## 2.4.2 Spins artificiels

*M. Aprili, J. Lesueur*

Articles dans des revues avec de lecture : [42, 43, 143, 158, 159]

Collaborations : W. Guichard, P. Gandit (IN Grenoble), A. Bauer, C. Strunk (U. Regensburg)

L'énergie libre d'un anneau supraconducteur interrompu par une jonction " $\pi$ " est la somme de l'énergie magnétique de l'anneau et de l'énergie Josephson de la jonction. En absence de champ magnétique externe, cette énergie s'écrit comme :  $F = \Phi^2/2L - \Phi_0 I_c / 2\pi \cos(2\pi\Phi/\Phi_0 + \pi)$  où  $L$  est l'inductance,  $I_c$  le courant critique de la jonction et  $\Phi$  le flux magnétique à travers l'anneau. Dans la limite non-linéaire,  $I_c L \gg \Phi_0$ , l'énergie Josephson domine et l'énergie libre est un double puit de potentiel (système à deux niveaux). L'état fondamental correspond à un flux spontané à l'intérieur de l'anneau. L'état fondamental est doublement dégénéré car les deux minima d'énergie sont identiques et symétriques par rapport au flux. Ils correspondent à un flux entrant ou sortant du plan de l'anneau et par conséquent à des courants spontanés circulant en sens horaire ou anti-horaire respectivement.

La détection d'un demi-quantum de flux d'un anneau hybride supraconducteur/ferromagnétique isolé a été réalisée en utilisant une sonde magnétométrique directement couplé à l'anneau. Nous avons déposé en utilisant la technique des masques suspendus sur résine (PES), un anneau supraconducteur de Nb (80nm d'épaisseur) interrompu par une jonction de PdNi de 7.5nm d'épaisseur qui correspond à un couplage " $\pi$ " sur une croix de Hall réalisée à partir d'un gaz d'électrons à 2D. Pour effectuer une expérience de contrôle nous avons préparé également des anneaux interrompus par une jonction "0". La concentration de Ni étant plus élevée que 18% le couplage  $\pi$  est atteint avec une épaisseur de PdNi plus faible. Nous avons choisi une épaisseur de PdNi correspondant au maximum du couplage " $\pi$ " pour minimiser les effets de fluctuations en épaisseur.

<sup>9</sup>Yafet, Phys Letters A98, 287 (1983)

<sup>10</sup>Parker, Phys. Rev. B 12, 3665 (1975)

Le capteur Hall mesure le champ magnétique produit par le courant spontané dans l'anneau, la tension Hall étant directement proportionnelle au champ magnétique. Le signal Hall mesuré en fonction de la température n'est détecté en-dessous de la température critique du Nb uniquement pour l'anneau- $\pi$ , ce signal suit la dépendance en température du courant critique de l'anneau.





## 3 Imagerie des milieux complexes

### 3.1 Introduction

Le laboratoire a développé des outils expérimentaux travaillant aux *limites physiques*, nos images représentent une distribution des propriétés physiques locales : imagerie thermique, microscopie interférométrique, imagerie de biréfringence et plus récemment *tomographie optique cohérente et, imagerie des tissus par interaction lumière-ultrasons*.

*Le cadre et les défis* : Le contraste optique dans l'examen du vivant est porteur d'informations à caractère morphologique et/ou fonctionnel. Les recherches menées depuis 8 ans au laboratoire visent à donner les outils nécessaires pour révéler ces contrastes à des échelles très différentes allant de quelques cm à quelques nm malgré la forte diffusion des tissus et les distorsions du front d'onde par les aberrations

La gestion des flux de chaleur est l'un des problèmes majeurs de la microélectronique. Depuis plusieurs années, notre laboratoire s'attache à développer des techniques d'imagerie de température adaptées aux circuits intégrés actuels en termes de fréquence, résolution spatiale et sensibilité en température.

### 3.2 Tomographie optique cohérente

*G. Monneron, K. Grieve, C. Boccara, A. Dubois*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [76, 226, 160, 111, 109, 108, 110, 139, 138, 182]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [262]

Conférences invitées : [268, 290, 291, 292, 293, 294, 287, 337, 339, 336, 338, 352, 353, 354, 394, 395]

Communications sans actes : [591, 559, 592]

Ouvrages scientifiques (ou chapitres) : [622]

Autres publications : [632]

Information et culture scientifique et technique : [648]

Nous avons fait la preuve que l'approche que nous avons proposée pour l'OCT (Optical Coherence Tomography) était sans doute la meilleure au niveau de la résolution spatiale : des tranches d'épaisseur inférieure au  $\mu\text{m}$  sont obtenues jusqu'à 1mm de profondeur dans les tissus animaux (mammifères, insectes etc.) ou humains avec un montage sans laser femtoseconde et avec une dynamique bien supérieure à la microscopie confocale (figure 1).

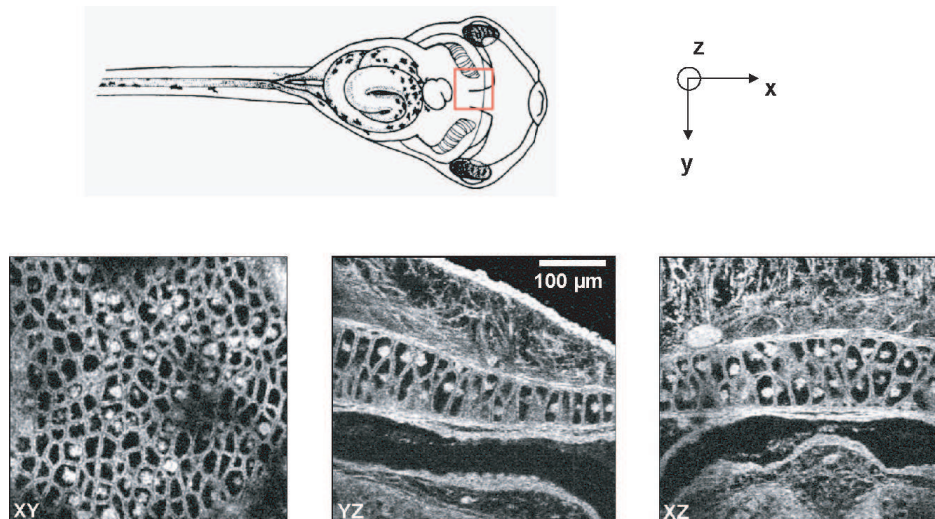


FIG. 3.1: Images tomographiques selon des plans orthogonaux dans la tête du têtard de grenouille Africaine (*Xenopus Laevis*) in vitro obtenues avec le système d'OCT plein champ développé à l'ESPCI. Le rectangle en rouge indique la zone où les images ont été enregistrées. La résolution isotrope de 1 micromètre permet la visualisation de structures subcellulaires telles que les membranes et noyaux. Différents stades de la mitose cellulaire peuvent être observés. Des tissus fortement contrastés apparaissent tels que l'épiderme, le canal olfactif et les mélanocytes.

Cependant l'utilisation d'une camera implique une stabilité  $\ll 1\mu m$  pendant la prise d'images ce qui est difficile pour les examens *in vivo* et deux voies ont été suivies avec succès : l'utilisation de flash (un têtard en train de nager a pu être "découpé" virtuellement) ou d'une camera rapide (examen des yeux de rongeurs et de chats). Plus récemment nous avons voulu étendre la quantité d'information disponible dans nos images OCT :

- Nous avons travaillé sur la *spectroscopie* des échantillons. Ce problème est non trivial car il y a opposition entre vouloir disposer de tranches fines (inversement proportionnelles à la largeur spectrale) et avoir une résolution spectrale pertinente. Une analyse fine des signaux sur-échantillonnés et d'effets 3 – D permet d'accéder au spectre.

- Nous avons également mesuré la *biréfringence des échantillons biologiques* dans leur profondeur (article sélectionné par l'American Institute of Physics pour le *Virtual Journal of Biological Physics Research*)

Enfin une étude sur les signes précurseurs de la mort cellulaire programmée dans les plantes de la famille arabidopsis, qui faisait suite à une étude par infrarouge thermique il y a quelques années, nous a permis de mettre en évidence des modifications morphologiques quelques minutes (au lieu de quelques heures par IR).

### 3.3 Imagerie par couplage lumière-ultrasons

Articles dans des revues avec comité de lecture : [75]

Conférences invitées : [270, 271, 297, 298, 286, 295, 296, 288, 289]

Conférences avec actes : [446]

Communications sans actes : [519]

Information et culture scientifique et technique : [649, 651]

Collaborations : Laboratoire Kaslter-Brossel (ENS, CNRS UMR8552), Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (CNRS), Laboratoire d'Imagerie Paramétrique (CNRS UMR 7623), Laboratoire Ondes et Acoustique (ESPCI, CNRS, Université Paris VII), Laboratoire d'Imagerie paramétrique (CNRS UMR 7623), Cancéropôle Ile-de-France

Nous sommes confrontés au triple défi de réaliser des images avec une bonne résolution spatiale dans des conditions de faibles signaux tout en respectant les contraintes liées à l'imagerie *in-vivo* qui limitent la puissance ultrasonore que l'on peut appliquer. Cela impose une mesure rapide pour s'affranchir de la décorrélation liée aux mouvements dans les tissus vivants (circulation sanguine, mouvement brownien). L'application des ultrasons pendant un temps "long" (de l'ordre de la seconde dans notre première approche basée sur la modulation linéaire de la fréquence, ou "chirp") est à proscrire d'abord parce qu'elle serait incompatible avec les normes médicales et ensuite parce qu'elle suppose une corrélation du speckle pendant toute la durée de la prise de mesure. Dans les tissus biologiques vivants le mouvement (par exemple la circulation sanguine) perturbe (ou décorrèle) le speckle en un temps de l'ordre de la milliseconde.

### 3.3.1 Holographie numérique hétérodyne hors-axe

*M. Atlan, P. Santos, F. Jean, M. Lesaffre, B.C. Forget*

#### 3.3.1.1 Application à l'imagerie acousto-optique

Articles dans des revues avec comité de lecture : [119, 46, 141]

Conférences invitées : [398, 399]

Communications avec actes : [440, 438]

Communications sans actes : [599, 512, 560]

La technique d'holographie numérique hors-axe (figure2) permet une détection par interférométrie des photons traversant un milieu diffusant épais avec une sensibilité optimale. Elle nous a permis de mettre au point l'imagerie acousto-optique en mode impulsif. Cette méthode est proche de l'imagerie échographique standard. Elle fait appel à des impulsions optiques et acoustiques pour marquer et repérer spatialement des photons diffusés dynamiquement. Dans cette configuration la résolution et le niveau de signal sont inversement proportionnels : en réduisant la durée de l'impulsion acoustique on améliore la résolution spatiale, mais on détériore d'autant le rapport signal sur bruit.

Nous avons développé une nouvelle approche basée sur une modulation pseudo aléatoire des ultrasons. Le grand avantage de celle-ci est de permettre un compromis idéal

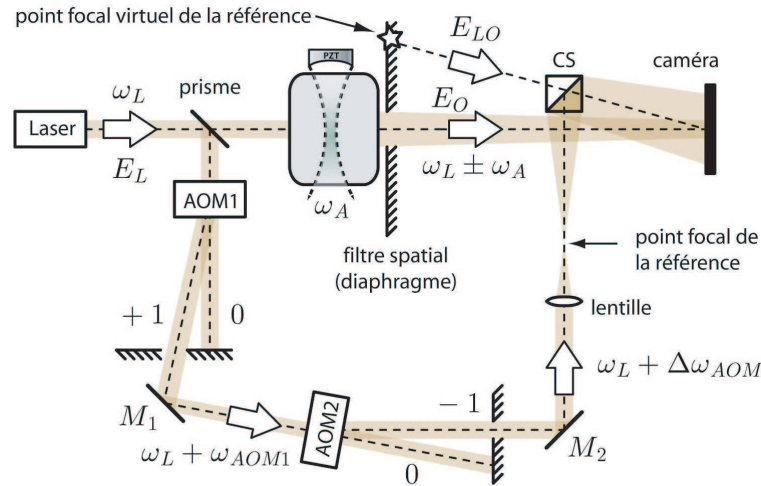


FIG. 3.2: Schéma de principe de l'holographie hétérodyne hors axe

entre la résolution et le niveau de signal. La première est fixée par la largeur de la fonction d'autocorrélation du motif pseudo aléatoire de l'impulsion. On peut donc allonger l'impulsion pour augmenter le rapport signal sur bruit tout en conservant la résolution millimétrique souhaitée. Le régime impulsionnel permet d'atteindre les limites permises médicalement. La modulation pseudo-aléatoire permet d'atteindre une résolution effective meilleure que la "longueur" des impulsions. Nous avons démontré la faisabilité de cette approche et nous travaillons maintenant à son intégration dans le système de génération des ultrasons du prototype commun que nous préparons avec l'équipe de Mathias Fink (Laboratoire Ondes et acoustique - ESPCI) pour des essais cliniques dans le cadre du Cancropôle d'Ile-de-France.

### 3.3.1.2 Application à la spectroscopie de la lumière diffuse

Articles dans des revues avec comité de lecture : [168, 50, 51, 45, 47, 50, 51, 140]

La nécessité de prendre en compte la décorrélation du speckle dans le cas de mesures de la lumière diffusée par des échantillons biologiques, in vivo, nous a permis de voir que notre méthode expérimentale pouvait s'appliquer dans le champ plus vaste de la spectroscopie de la lumière diffusée dynamiquement. Depuis, nous développons, caractérisons, et appliquons cette technique originale de détection hétérodyne spatio-temporelle, performante et unique au monde. La spectroscopie de la lumière diffusée dynamiquement est utilisée in vivo pour caractériser les processus statistiques dynamiques sans résoudre spatialement les diffuseurs. Elle permet par exemple déterminer les flux dans les tissus humains pour suivre la néovascularisation dans une greffe de peau. Il existe aujourd'hui deux classes de techniques d'imagerie pour étudier ce type de phénomènes : l'imagerie Doppler laser et l'analyse de contraste spatial du speckle.

Nous avons montré que notre méthode de détection hétérodyne spatiotemporelle pouvait allier les avantages des deux types de méthodes, à savoir une grande sensibilité, une mesure parallèle sur les pixels d'une caméra, une bonne résolution temporelle, l'accès à un signal quantitatif (le décalage de fréquence). Nous avons validé cette technique de détection en réalisant des images *in vivo* de la perfusion sanguine sur le cortex de souris. Nous avons obtenu une cartographie 2D de l'élargissement spectral (dans la gamme du kilohertz) utilisé comme estimateur de la perfusion locale et nous avons pu suivre des variations de cette perfusion suite à l'injection d'un inhibiteur des monoamines oxydases (vasoconstricteur), visant à perturber la circulation sanguine. Les images obtenues présentent des contrastes jamais atteints précédemment.

### 3.3.2 Nouveaux modes d'imagerie lumière-ultrasons

#### 3.3.2.1 Holographie rapide par adaptation du front d'onde pour l'imagerie acousto-optique

*M. Lesaffre, F. Ramaz, E. Bossy*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [169, 142, 209]

Conférences invitées : [397]

Communications avec actes : [454, 453, 466, 476, 475, 484, 483, 485, 450]

Communications sans actes : [523, 561, 581, 582, 583, 584, 598, 604]

Valorisation : [662]

Cette méthode, dont nous sommes les précurseurs au niveau international, permet de mesurer l'interférence entre le champ des photons marqués et un faisceau référence qui en est sa réplique spatiale. Il y a donc une cohérence spatiale des sources qui interfèrent, et l'on s'affranchit d'un effet de moyenne du speckle suite à l'intégration du signal sur la surface du détecteur. La mesure est rapide ( $10kHz$  et plus), avec un post-traitement limité, car un simple monodétecteur de grande surface ( $1cm^2$ ) peut être utilisé ; nous pouvons effectuer des mesures qui seront peu affectées par la décorrélation du speckle dans les milieux vivants ( $> kHz$ ), et qui dégradent le contraste du signal. Dans la pratique, les faisceaux signal et référence se mélangent dans un cristal photoréfractif, qui présentent des propriétés de photoconduction et de rectification optique, qui peuvent modifier localement son indice de réfraction ; cela permet d'inscrire rapidement un hologramme de la figure de speckle. Comme conséquence, la référence diffracte dans la direction des photons provenant du milieu un faisceau isomorphe (en amplitude et en phase). On enregistre ainsi dans le plan du détecteur un signal d'interférence entre ces deux ondes spatialement cohérentes, dont l'amplitude est proportionnelle au signal acousto-optique.

L'hologramme entre les photons marqués et la référence oscille à  $2MHz$  (fréquence ultrasonore). Cette cadence trop élevée ne peut induire dans le cristal un effet photoréfractif, même à forte puissance du laser de pompe ( $1W/cm^2$ ), mais on peut décaler le faisceau référence de la fréquence des ultrasons, afin que le battement tombe dans la

fenêtre de réponse temporelle du cristal : seul l'hologramme des photons marqués est inscrit. Il faut ajouter une modulation sur les ultrasons (de phase par exemple) afin d'éliminer les flux continus à la détection (mesure par détection synchrone à typiquement quelques  $kHz$ ).

Les premières mesures à 1064nm avec des cristaux de GaAs ont validé la méthode avec 4cm de blanc de poulet et un laser d'environ 100mW, un détecteur InGaAs ( $\phi=5mm$ ), et une pression acoustique de 1MPa. Nous avons également effectué le balayage latéral d'inclusions absorbantes dans quelques centimètres de blanc de poulet.

Un certain nombre d'options ont été envisagées pour optimiser la mesure et modéliser la réponse du montage. Nous avons appliqué une modulation d'amplitude sur les ultrasons (également à quelques  $kHz$ ). Dans ce cas, il n'y a pas de décalage en fréquence des bras de l'interféromètre : en l'absence d'ultrasons, on enregistre l'hologramme statique des photons diffusés. En présence de l'onde acoustique, une fraction des photons est décalée en fréquence et efface partiellement l'hologramme. Nous mesurons alors une détérioration du contraste, à la fréquence de modulation des ultrasons, et avons à nouveau accès au signal acousto-optique. Nous avons mesuré une variation quadratique du signal en fonction de la pression acoustique appliquée, en conformité avec notre modèle.

La mesure du temps de vie de l'effet photoréfractif ( $\tau_{PR}$ ) est un point clé du succès de la méthode. Un établissement rapide, et de préférence en dessous de 0.1ms permettra de mesurer un signal non dégradé par la décorrélation du speckle. Le temps de vie est inversement proportionnel à la densité de puissance dans le cristal, et donc à la puissance de pompe. Cette mesure est en principe tout à fait standard si l'on prend des faisceaux "propres", mais compte tenu de l'inhomogénéité du champ de speckle dans le cristal, il paraît plus fiable de pouvoir effectuer cette mesure directement sur le montage. Nous avons développé une méthode originale de décalage en fréquence qui nous permet de mesurer précisément ce temps de vie dans les conditions réelles de l'imagerie acousto-optique, avec une grande robustesse face aux conditions expérimentales. Nous obtenons un temps de vie très voisin (0.25ms) du temps de corrélation du milieu, grâce à l'acquisition d'un amplificateur optique à fibres qui peut délivrer une puissance de quelques Watts.

### 3.3.2.2 Opto-élastographie

*K. Daoudi, A. Funke, E. Bossy*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [81],

Communications avec actes : [448]

Valorisation : contrats de recherche, partenariat industriel, créations d'entreprise : [652]

Parallèlement aux méthodes de détection de la modulation acousto-optique explicitées ci-dessus (holographie numérique sur CCD et par adaptation du front d'onde avec cristal photoréfractif), nous mettons également en place une expérience "d'élastographie acousto-optique" : la modulation acoustique servant à moduler la lumière dans le cadre

des mesures acousto-optiques conventionnelles est due à la modulation à la fréquence ultrasonore ( $MHz$  typiquement) de la position des diffuseurs et de l'indice optique du milieu. Les déplacements obtenus sont en général au plus de l'ordre de quelques nanomètres. Si on utilise des trains d'ondes ultrasonores focalisés de forte puissance instantanée (possible en restant dans les limites permises médicalement si la puissance moyenne reste faible, donc à faible rapport cyclique), le milieu est également soumis, en plus du déplacement "classique" à la fréquence ultrasonore, à une poussée "en bloc" (pression de radiation) provoquant des déplacements de l'ordre du  $\mu m$  (par opposition aux  $nm$  de l'oscillation ultrasonore) sur des temps de l'ordre de la  $ms$ . Ce phénomène est mis à profit au Laboratoire Ondes et Acoustique de l'ESPCI, avec lequel nous collaborons étroitement, pour générer une onde de cisaillement, qu'on peut "filmer" au cours de son déplacement (lent, quelques  $mm/ms$ ) par imagerie ultrasonore ultrarapide. Dans le cadre des mesures combinant optique et acoustique, ce phénomène peut être intéressant pour plusieurs raisons : d'une part, le fait d'avoir un déplacement en bloc de la zone focale de l'ordre de quelques  $\mu m$  pourrait avoir un effet plus important que celui de la modulation à la fréquence ultrasonore (qq  $nm$  de déplacement alternatif), pour une puissance ultrasonore moyenne équivalente. En effet, la poussée est obtenue en mode impulsif, mode pour lequel la puissance ultrasonore moyenne délivrée au tissu peut-être maintenue dans les normes de sécurité en jouant sur la fréquence de répétition des poussées. Les techniques existantes peuvent être appliquées (à la condition a priori de n'être pas basée sur la fréquence d'oscillation ultrasonore) ou adaptées. D'autre part, une mesure optique des effets de la pression de radiation reflète non seulement une propriété optique (typiquement l'absorption, comme pour les techniques acousto-optiques standards, i.e. la zone déplacée laisse-t-elle passer la lumière ?), mais également une propriété mécanique. Le déplacement du milieu en réponse à la poussée ultrasonore dépend en effet du module d'Young et de la viscosité du matériau, paramètres présentant également un intérêt du point de vue clinique. Nous avons récemment démontré la faisabilité d'une telle approche sur des gels de plusieurs cm d'épaisseur dont les propriétés mécaniques et optiques sont proches de celles des tissus : Nous avons tout d'abord réalisé la détection d'un contraste optique, en analysant une série temporelle d'image de speckle qui présentent une décorrélation transitoire lorsque le milieu est mis en mouvement par la pression de radiation. Nous venons tout récemment de vérifier expérimentalement que cette approche permet la détection de contrastes optiques d'une part, mais également la détection de contrastes élastiques (modules d'Young), et nous avons de plus démontré que l'on pouvait discriminer ces deux types de contrastes. Nous étudions actuellement les limites de la technique, en terme de sensibilité, de résolution et de faisabilité in vivo.

### 3.3.2.3 Renversement temporel d'ondes photoacoustiques

*K. Daoudi, A. Funke, E. Bossy*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [80]

Communications avec actes : [449]

La génération d'ondes acoustiques par absorption optique (effet photoacoustique) est mise en œuvre par de nombreux groupes dans le but de fournir une image des propriétés optiques d'absorption d'un tissu, en profondeur avec la résolution des ultrasons. Nous avons récemment entrepris d'utiliser l'effet photo-acoustique pour des expériences de retournement temporel ultrasonore, en collaboration avec le Laboratoire Ondes et Acoustique. Le retournement temporel d'ondes ultrasonores est habituellement basé sur la réémission d'ondes ultrasonores générées dans le milieu par une source de nature acoustique (un hydrophone inséré à dessein dans le milieu, ou un réflecteur acoustique renvoyant un écho d'une onde ultrasonore envoyée dans le milieu). Il peut permettre d'apprendre à re-focaliser vers une source ultrasonore, par exemple en présence d'un milieu aberrateur qui empêche une focalisation classique basé sur des lois de retards en milieu homogène. Le retournement temporel d'ondes ultrasonores d'origine photoacoustique, que nous venons de démontrer expérimentalement pour la première fois [ACL-Bossy2006a], permet donc d'apprendre à focaliser sur un contraste de nature optique. Nous avons proposé dans un projet ANR (accepté en Juillet 2007, pour la période 2008-2010) d'appliquer cette approche dans le cadre de la thérapie ultrasonore : retourner l'onde émise par photoacoustique, après amplification de puissance, peut permettre de chauffer et "brûler" des régions optiquement contrastées. La technique permettra dans ce cas non seulement de détecter le contraste optique (qui peut être indétectable de façon purement optique ou purement ultrasonore), mais aussi d'agir en retour sur ce contraste optique par thérapie ultrasonore.

#### **3.3.2.4 Modélisation d'ondes acoustiques et milieux complexes**

*E. Bossy*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [79, 86, 84, 85, 83, 189, 196, 197, 211]

Conférences invitées : [307]

Communications avec actes : [451]

Communications sans actes : [522, 524, 521, 525, 520, 605]

Ouvrages scientifique (ou chapitres) : [621]

Cette activité s'articule autour de la propagation ultrasonore dans l'os, cortical et trabéculaire. Un des enjeux de ces travaux est de comprendre les mécanismes d'atténuation d'un faisceau ultrasonore à la traversée d'une paroi osseuse, telle que le crâne (pour l'imagerie ou la thérapie du cerveau) ou le talon (pour le diagnostic de pathologie comme l'ostéoporose)

### **3.4 Imagerie thermique de circuits intégrés**

Collaborations industrielles : Thales (Corbeville, France), ST microelectronics (Agrate, Italie), SOITEC (Bernin, France), Picogiga (Les Ulis, France),



Collaborations académiques : Peter Raad, Southern Methodist University (Dallas, USA), Sophie Bouchoule, LPN (Marcoussis, France), Frederic genty, CEM2 (Montpellier, France), Sebastian Volz, EM2C (Chatenay Malbry, France), Stefan Dilhaire, CPMOH (Bordeaux, France), Bruno Palpant, INSP (Paris, France), Christian Bergaud, LAAS (Toulouse), Lionel Rousseau, Gaëlle Lissorgues, ESIEE (Noisy le Grand, France), Equipes membres du GDR CNRS Micro et Nano thermique

### 3.4.1 Imagerie de thermoréfectance

#### 3.4.1.1 Thermoréfectance sous illumination visible

*M. Bardoux, C. Filloy, D. Fournier, G. Tessier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [103, 129, 128, 151, 234, 233, 232, 235, 238, 236, 237, 229, 228, 231]

Conférences invitées : [342, 346, 344, 403]

Communications avec actes : [452, 458, 461, 465, 470, 471, 473, 472, 482, ?, 494, 491, 496, 498]

Communications sans actes : [527, 526, 547, 555, 564, 563, 610, 606, 607, 609, 608]

Ouvrages scientifique (ou chapitres) : [620]

Ouvrages de vulgarisation (ou chapitres) : [624]

Valorisation : contrats de recherche, partenariat industriel, créations d'entreprise : [671, 667, 668]

Les mesures de thermoréfectance utilisent le lien entre coefficient de réflexion ( $R$ ), et température ( $T$ ). L'approche développée dans notre laboratoire consiste à utiliser une caméra CCD pour effectuer cette mesure difficile ( $dR/dT$  est de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-5}K^{-1}$ ) et obtenir une imagerie de température à haute résolution sur des circuits intégrés en fonctionnement. Outre la possibilité d'obtenir rapidement des images, ce système permet l'utilisation d'une grande variété de sources lumineuses, puisque l'illumination est incohérente. Cette configuration, depuis peu adoptée par de nombreux laboratoires internationaux, nous a naturellement conduit à explorer une très large gamme de longueurs d'onde, de l'infrarouge à l'ultraviolet. Le système d'imagerie thermique de circuits intégrés est aujourd'hui pleinement opérationnel, et présente des performances le situant au meilleur rang mondial en termes de résolution spatiale (moins de  $300nm$ ), thermique (de l'ordre de  $0.1K$  sur certains échantillons) et rapidité d'acquisition (de l'ordre de la minute pour  $10^6$  pixels). Les efforts récents ont porté sur l'étalonnage et l'évaluation de la précision des mesures en comparant les températures obtenues par thermoréfectance, avec une modélisation par volumes finis et des mesures locales par senseurs *ad hoc* intégrés à l'échantillon. Nous avons pu montrer que les circuits intégrés recouverts d'une couche de passivation sont le siège d'interférences qui modifient fortement  $R(\lambda)$  et  $dR/dT(\lambda)$ . Un montage spectroscopique, permettant de mesurer très rapidement des spectres de  $dR/dT(\lambda)$  a été réalisé de manière à étayer ces modèles.

### 3.4.1.2 Thermoréflectance à haute fréquence

*C. Filloy, G. Tessier, D. Fournier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [117, 116]

Communications avec actes : [456, 455]

Communications sans actes : [548, 549]

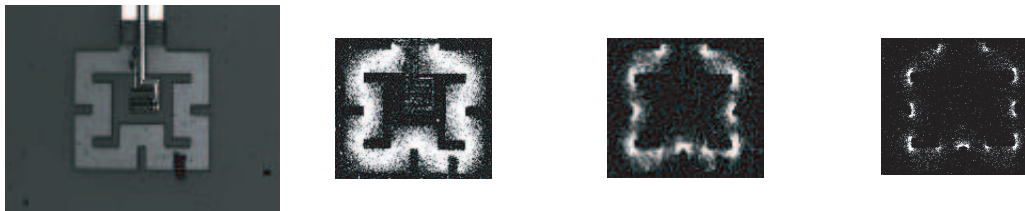


FIG. 3.3: a) image optique d'une résistance, b), c) et d) images thermiques de la composante HF de la modulation de température obtenue en alimentant la résistance à  $F=2\text{kHz}$ ,  $950\text{kHz}$ , et  $4,8\text{MHz}$  respectivement.

Beaucoup de circuits intégrés actuels sont capables de travailler à de très hautes fréquences (HF), allant jusqu'au  $\text{GHz}$ . Les composantes continue et modulée du champ de température interviennent toutes deux dans les éventuels processus de destruction, particulièrement dans la mesure où seule la composante HF est confinée à des échelles submicroniques. A ce titre, il est donc important de pouvoir cartographier chacune de ces composantes. Le dispositif décrit plus haut a été adapté à l'étude de hautes fréquences selon deux méthodes :

La première permet d'imager la composante HF de  $T(t)$  en utilisant une illumination (LED) modulée à une fréquence légèrement différente ( $F + f$ ) de celle à laquelle est alimenté le circuit ( $F$ ). La partie modulée de  $R(t)$ , donc de  $T(t)$  est ainsi mesurée à la fréquence de battement,  $f$ . Le montage permet ainsi d'analyser, en théorie, des échauffements modulés jusqu'à  $80\text{MHz}$ . Cependant, la composante HF de la température  $T(t)$  devient trop faible pour être mesurée avec un bon rapport signal à bruit au delà de quelques  $\text{MHz}$ . La seconde approche consiste à utiliser des vecteurs de test dont la fréquence  $F$  peut atteindre plusieurs centaines de  $\text{MHz}$ , voire le  $\text{GHz}$ , en les répétant à des cadences basse fréquence  $f$ , de l'ordre du  $\text{Hz}$ . Cette approche a été validée avec succès sur des circuits numériques et des transistors de puissance (Thales).

## 3.4.2 Imagerie de circuits intégrés

### 3.4.2.1 Application aux VCSELs

*M. Bardoux, D. Fournier, G. Tessier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [495, 492]

Communication sans actes : [516]

Dans le cadre d'une collaboration avec le LPN, nous avons étudié des lasers à émission verticale (VCSELS). Ce type d'architecture rend très difficile l'obtention d'une mesure de température suivant la direction verticale des structures, qui sont constituées d'empilements de couches opaques dans le visible. L'approche originale adoptée ici consiste à cliver ces VCSELS en deux tout en les maintenant fonctionnels : on a ainsi accès à la tranche des couches. Sur des VCSELS clivés en fonctionnement, nous avons obtenu des images de thermoréfectance permettant d'obtenir un profil de température à travers les couches. D'autres mesures réalisées en éliminant par gravure les couches superficielles du VCSEL, de manière à accéder à la température des jonctions tunnel d'injection, sont venu corroborer ces résultats.

#### **3.4.2.2 Thermoréfectance proche infrarouge à résolution sub- diffraction**

*M. Bardoux, C. Boué, G. Tessier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [230]

Conférences invitées : [404, 402]

Les circuits intégrés actuels présentent une structure tridimensionnelle dans laquelle les sources de chaleur sont enterrées sous plusieurs micromètres de couches diélectriques (encapsulation) et métalliques (interconnexions et pistes) qui rendent difficile toute mesure de température. Pour y accéder, nous avons développé un système utilisant une caméra InGaAs proche IR (1,1 à 1,7  $\mu m$ ) pour pénétrer par la face arrière dans le substrat de silicium, transparent à ces longueurs d'onde. Des images à la limite de diffraction (1,7  $\mu m$ ) ont été obtenues. La résolution a ensuite pu être poussée au-delà, jusqu'à 440nm, en utilisant une lentille à immersion solide tirant parti du fort indice du silicium pour augmenter l'ouverture numérique jusqu'à 2,4.

### **3.4.3 Nouveaux développements d'imagerie thermique haute résolution**

#### **3.4.3.1 Imagerie infrarouge**

*C. Boué, D. Fournier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [88]

Les images délivrées par les logiciels associés aux caméras infrarouges commerciales ne tiennent pas compte de la basse émissivité des zones métalliques et affichent des images qui ne sont pas toujours représentatives des cartographies en température.

Nous avons proposé une méthode permettant d'obtenir des cartographies de température absolue après calcul de la carte d'émissivité. La résolution spatiale a été augmentée en intercalant un anneau entre l'objectif et la caméra. Moyennant un traitement des images pour s'affranchir des déformations introduites par l'anneau, la résolution atteint les limites imposées par la diffraction, soit 40  $\mu m$ .

Une autre possibilité pour améliorer la résolution spatiale de la caméra est d'augmenter l'ouverture numérique du système optique. Pour ce faire, un montage proche de celui utilisé dans le proche infrarouge a été réalisé, en déposant une lentille hémisphérique en silicium, d'indice élevé ( $n = 3,5$ ) sur la face arrière polie d'un circuit intégré. Ainsi, sur des échantillons résistifs d'or sur silicium nous avons pu améliorer la résolution spatiale d'un facteur 10.

### 3.4.3.2 Sonde fluorescente à balayage pour la cartographie de températures

*B. Samson, L. Aigouy, G. Tessier*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [35, 215]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [255]

Communications avec actes : [422]

Communications sans actes : [603, 602, 601]

Valorisation : [670]

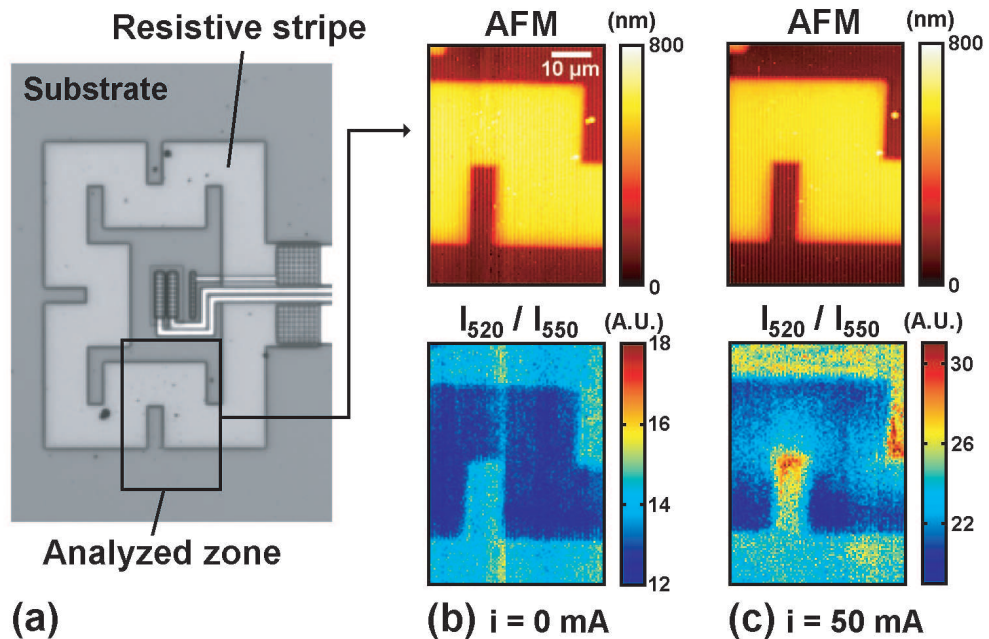


FIG. 3.4: (a) image optique classique du composant ; (b) images topographique (en haut) et de fluorescence (en bas) du composant au repos ; (c) images topographique (en haut) et de fluorescence (en bas) du même composant lorsqu'un courant de 50mA circule dans la piste résistive. Un point chaud est clairement visible aux endroits où la piste tourne, synonyme d'un effet Joule plus important

Le microscope à balayage développé au laboratoire permet d'obtenir des images de la température de surface sur des circuits intégrés en fonctionnement. Pour cela, un frag-

ment de verre dopé est fixé à l'extrémité d'une pointe et balayé au dessus de la surface. Le suivi spectroscopique des raies de fluorescence permet d'accéder à la température du cristal, donc de l'échantillon. S'agissant d'une technique de champ proche, la résolution obtenue est excellente ( $300nm$ ).

Un travail d'intercomparaison quantitative avec le système de réflectance a été réalisé, notamment sur des pistes métalliques chauffantes dans le cadre de l'ANR PNano Nanothermofluo.



# 4 Instruments et méthodes

## 4.1 Introduction

La conception d'instruments originaux et performants, le développement de nouvelles méthodes et outils de mesure, forment en quelque sorte le socle commun du laboratoire. Nous avons dans l'ensemble la même approche instrumentale de la physique, dont la base est la recherche de la meilleure sensibilité, des performances limitées par les bruits fondamentaux. Que ce soit dans le domaine du champ proche, de la tomographie optique, de l'imagerie thermique, etc., nous cherchons systématiquement à atteindre et à contourner les limites imposées par la physique. Cette approche n'est pas récente puisque dès la naissance de l'UPR5, la conception du modulateur de biréfringence par J. Badoz a permis d'atteindre la limite imposée par le bruit de photons dans de nombreuses expériences de spectroscopie et de polarimétrie.

Un second point qui caractérise le développement et la dynamique du LPEM est le constant enrichissement et la diffusion rapide de ce socle de développements instrumentaux. Le modulateur de biréfringence a permis l'émergence des méthodes de microscopie interférométrique différentielle au milieu des années quatre-vingt-dix ; plus tard cette microscopie a stimulé l'apparition de techniques d'imagerie plein champ aussi bien en microscopie interférométrique qu'en photothermique et en métrologie optique. Ces avancées successives se sont faites sous l'impulsion d'un groupe, mais ont été alimentées et ont atteint leur maturité grâce à l'ensemble de l'UPR. Récemment le passage à l'imagerie tridimensionnelle a suivi cette même logique, et va pouvoir profiter aussi bien à la microscopie conventionnelle, qu'à la nano-imagerie où à la vision industrielle. Cette dynamique impulsion/diffusion n'est efficace que parce que nous arrivons à préserver les acquis de l'UPR et à les réactualiser, à les adapter à nos besoins actuels. Nous envisageons avec confiance les futures avancées en spectroscopie en champ proche et en spectroscopie de nanoobjets parce que nous avons déjà dans l'UPR toutes les compétences nécessaires en spectroscopie, et nous y greffons simplement nos progrès récents en microscopie de champ proche et en nanophysique. Il est intéressant de remarquer que l'équipe de chercheurs travaillant sur le thème des électrons en interaction, et qui ont été intégrés récemment à l'UPR, bien que concernés par des problèmes très fondamentaux de physique du solide, partagent cette même approche instrumentale. Les liens qui se tissent entre différents groupes, en particulier à travers les techniques de champ proche optique, permettent d'étendre lentement mais sûrement, ce socle commun d'instrumentation à l'ensemble de l'unité. Nous avons distingué dans ce thème transverse deux grandes directions : d'une part l'imagerie bi ou tridimensionnelle, qui

regroupe un ensemble important de techniques développées dans l'unité, et d'autre part le développement de divers instruments originaux.

## 4.2 Nouvelles méthodes d'imagerie

Les instruments de mesure qui étaient conçus jusqu'à présent par l'UPR étaient cantonnés à des mesures locales (comme les différents instruments de photothermie), ou point à point (comme les microscopes interférométriques). Récemment, et simultanément, la majorité des groupes de recherche s'est tournée vers l'imagerie. Que ce soit dans le domaine du champ proche, de l'interférométrie ou de la thermique, nous avons mis au point des instruments capables de fournir des informations bi ou tridimensionnelles, basés sur de nouvelles méthodes de codage du signal, comme l'illumination structurée, l'utilisation de la cohérence spatiale, ou des techniques plus classiques de modulation.

### 4.2.1 Développement de techniques 3D en microscopie optique

*D. Dubertret, A.C. Boccara, A. Fragola, F. Chasles, V. Lorient*

#### 4.2.1.1 Microscope confocal plein champ

Les sondes optiques que nous développons formées de nanocristaux de semi-conducteurs (quantum dots ou QD) ont des propriétés optiques uniques que l'on ne retrouve ni dans les fluorophores organiques ni dans les lanthanides. Plus spécifiquement, les QD sont extrêmement résistants au photoblanchiment et ont une longueur d'onde d'émission en fluorescence qui est directement reliée à leur taille. Ces propriétés suggèrent qu'il est possible de développer des instruments dédiés spécifiquement à la détection de ces sondes. Nous avons entrepris de mettre au point deux types de microscopes permettant de visualiser les QD. Nous avons décidé de mettre au point un système de microscopie confocale à grille autrement appelé "illumination structurée". Le principe consiste à placer une grille dans le plan du diaphragme de champ du microscope pour la projeter sur l'échantillon étudié. Celle-ci est ainsi imagée sur la tranche de l'échantillon positionnée dans le plan focal de l'objectif. Contrairement à la microscopie confocale classique, les images sont acquises en plein champ et il n'est pas nécessaire d'avoir une source laser, les quantum dots étant excités grâce à une lampe à mercure. Ce microscope nous a permis d'obtenir des coupes optiques de plusieurs échantillons. Pour l'instant, nous arrivons à obtenir des coupes dont l'épaisseur est de l'ordre du micron en 300 ms.

#### 4.2.1.2 Technique de microscopie plein champ par modulation de la position de l'objectif

Articles dans des revues avec comité de lecture : [99]



En utilisant une modulation de la position de l'objectif, nous avons mis au point une technique de microscopie de fluorescence plein champ permettant d'obtenir d'une part des sections optiques de l'échantillon et d'autre part une localisation des particules fluorescentes en trois dimensions avec une précision de quelques dizaines de nanomètres. L'idée développée est la suivante : la modulation de la position de l'objectif à la fréquence  $\omega$  produit une modulation du signal fluorescent  $I$  dans le plan focal à deux fréquences :  $\omega$  et  $2\omega$ . Les fluorophores situés dans le plan focal sont modulés à la fréquence  $2\omega$  avec un maximum du signal dans le plan de mise au point, et à  $\omega$  avec une intensité nulle dans le plan de mise au point. Les signaux  $I_\omega$  et  $I_{2\omega}$  peuvent être extraits à partir de quatre images enregistrées pendant une période de modulation. Le rapport  $I_{2\omega}/I_\omega$  est directement relié à la position des fluorophores et permet de les localiser avec une précision de 10nm dans le plan optique et de 32nm dans le plan perpendiculaire.

#### 4.2.1.3 Illumination structurée 3D

L'illumination structurée est un moyen astucieux qui permet d'élargir la bande passante d'un système optique. Nous avons conçu un système d'illumination pour microscope optique qui permet de structurer l'illumination dans les trois dimensions et ainsi améliorer non seulement la résolution latérale des microscopes optiques, mais d'obtenir également un codage axial dans les échantillons. Ce système d'éclairage combine les avantages de l'illumination structurée classique pour l'amélioration d'un facteur au moins égal à deux de la résolution latérale, de la microscopie confocale en ce qui concerne l'amélioration du contraste, et apporte un avantage nouveau qui est celui de localiser en trois dimensions des objets sans nécessité de déplacer l'échantillon ni de réaliser des coupes optiques.

#### 4.2.2 Sondes locales multiples pour l'imagerie 3D

*G. Moneron, A. Dubois, A.C. Boccara*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [166]

Communications sans actes : [592, 591]

Conférences invitées : [395, 286]

Ouvrages scientifiques : [622]

Pour cette technique nous utilisons des nano-objets " browniens " comme sondes du champ proche optique dans les 3 dimensions de l'espace. La position de chacune de ces nano-sondes est déterminée avec une précision de l'ordre du nanomètre. Nous réaliserons ainsi l'équivalent d'un microscope à force atomique (AFM) fonctionnant en 3 dimensions. La résolution des images produites par ce microscope à sondes locales multiples sera donnée par la taille des sondes utilisées (~10 à 50 nm). Le dispositif expérimental utilise un microscope interférométrique en lumière blanche. A partir d'une pile d'images interférométriques acquises à des profondeurs successives on peut déterminer la position axiale ( $z$ ) des billes avec une précision d'environ 20nm.

Pour le projet de microscopie de champ proche 3D, les sondes locales sont des particules " browniennes " , c'est à dire telles que l'influence de la gravité soit négligeable devant la force de Langevin induite par l'agitation thermique du fluide dans lequel baigne la structure. Nous utilisons des sphères d'or de taille nanométrique (entre 10 et 100nm). Pour figer le mouvement de ces billes pendant le temps de la mesure, nous utilisons comme source d'éclairage une lampe à arc au Xénon délivrant des flashes de  $2\mu s$  de durée. La concentration des billes est choisie suffisamment faible pour que leur observation individuelle soit possible, mais assez élevée pour qu'un grand nombre de ces sondes participe en parallèle à l'exploration de la structure de l'objet. Le dispositif expérimental est basé sur un microscope interférométrique avec deux caméras CCD permettant d'enregistrer simultanément 2 images interférométriques en opposition de phase. Pour valider le principe, nous avons étudié tout d'abord la structure de sphères d'agarose, en reconstruisant des images à haute résolution des volumes interstitiels.

### 4.2.3 Lecture de mémoires 3D par OCT

*B.C. Forget, A. Dubois, F. Ramaz, B. Briat*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [213]

Communications avec acte : [486]

Les milieux photosensibles à un marquage non linéaire permettent une bonne localisation spatiale des variations des constantes optiques. Ils sont donc de bons candidats pour réaliser des mémoires optiques en volume, avec une densité de stockage dépassant le Tbit/cm<sup>3</sup>. La plupart des travaux menés sur le sujet proposent des montages utilisant une technique de fluorescence afin de lire ces mémoires. Il est également possible d'utiliser des réseaux de fibres monomodes dont on crée la sélectivité par un réseau de Bragg photo-induit. Notre projet de lecture de ces mémoires fût innovant (collaboration avec Ecole Polytechnique, IPCMS et IOTA dans le cadre d'une ACI Jeune Chercheur), car c'est utilisant une source lumineuse de faible longueur de cohérence ( $1\mu m$ ) que nous pouvons sélectionner une petite zone ( $< 1\mu m^3$ ) dans le volume, par l'interférence entre la lumière rétrodiffusée et une onde de référence en utilisant une technique originale de tomographie optique cohérente initialement développée au laboratoire par A. Dubois. Le montage OCT prévu dans le cahier des charges de l'ACI pour la lecture de ces mémoires a été réalisé. Cette approche de lecture par OCT a été validée avec un certain nombre d'échantillons solgels dopés avec des colorants organiques, initialement envisagés comme matériaux lasers.

Parmi les premiers résultats sur ces échantillons, nous avons pu mesurer des seuils énergétiques d'inscription, par ailleurs assez voisins du seuil de dommage de la matrice hôte pure, sans doute à cause d'une concentration trop faible du dopant. La venue de nouveaux échantillons s'est heurtée à de nombreux problèmes de fabrication, notamment au niveau de la stabilité du matériau. En conséquence, ce projet n'a pas été défini comme prioritaire au sein de l'équipe et s'est provisoirement arrêté.

#### 4.2.4 Imagerie et spectroscopie Terahertz : Champ proche et ultra-proche

*S. Grésillon, R. Lecaque*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [137, 161]

Communications sans actes : [565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572]

Conférences invitées : [361, 359, 360]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [261]

Ces quinze dernières années, le domaine des Téraherz (THz, 0,1 à 10 THz) a été l'objet de travaux fructueux. En effet, l'amélioration des lasers impulsions ultra-courts (durées d'impulsion inférieures à 100fs) a permis de développer de nouvelles sources terahertz puissantes et impulsives. Parallèlement, les détecteurs d'ondes THz se sont développés aussi sur cette base. Munis de tels systèmes de génération et de détection, imagerie et spectroscopie THz se sont développées conjointement dans des domaines aussi variés que la physique fondamentale, la chimie des polluants et des gaz toxiques, ou encore la biologie. Toutefois, le principal inconvénient d'une imagerie THz est la mauvaise résolution du fait de la diffraction (résolution limitée par la longueur d'onde THz, voisine de 300  $\mu\text{m}$ ).

Au laboratoire, nous avons mis au point un système d'imagerie THz performant en termes de résolution et d'identification d'objets microscopiques et sub-microscopiques. Une méthode d'imagerie haute résolution en commun avec une spectroscopie fine permet de révéler des contrastes uniques, notamment dans les études biomédicales ou sur les polluants (le domaine THz est celui des énergies vibrationnelles des molécules) mais aussi dans les supraconducteurs (le gap des supraconducteurs à haute température critique se situe dans le domaine THz). Pour réaliser ce dispositif, deux méthodes complémentaires pour atteindre une résolution sub-longueur d'onde dans les images THz sont mises en oeuvre au laboratoire.

La première consiste à réaliser, par rectification optique, une source terahertz sub longueur d'onde. En focalisant une impulsion ultrabrève dans un matériau non linéaire et non centrosymétrique, nous avons pu générer une impulsion THz large bande (0,5 à 30 THz) dont la dimension spatiale est inférieure à 30  $\mu\text{m}$  pour une longueur d'onde moyenne de 250  $\mu\text{m}$ , fixant ainsi la résolution accessible par cette méthode (article publié dans *Opt. Comm* en 2005 et un autre article soumis). Nous développons actuellement un système de détection permettant d'avoir accès à l'amplitude et à la phase du champ THz.

Dans un deuxième temps et pour améliorer encore la résolution du système de détection, nous souhaitons appliquer la technique du SNOM sans ouverture déjà expérimentée avec succès dans le domaine du visible et de l'infrarouge au laboratoire. Elle consiste à approcher une pointe métallique (de rayon de courbure de quelques dizaines de nanomètres) à la surface de l'échantillon afin de récupérer par diffusion les ondes évanescentes. La résolution que l'on espère atteindre est alors voisine de plusieurs di-

zaines de nanomètres et limitée uniquement par la taille de l'apex de la pointe.

## 4.2.5 Imagerie infrarouge

### 4.2.5.1 Applications en contrôle non destructif

La thermographie infrarouge permet de mettre en évidence des défauts localisés sur la surface d'un objet par la mesure de l'évolution de sa température. Des mesures infrarouges avec la caméra IR CEDIP à  $5\mu m$  du laboratoire ont été faites au laboratoire LMT de Cachan afin de valider leur nouveau montage de traction biaxiale. Cette étude leur a permis de s'assurer de la symétrie des contraintes sur les fixations d'une éprouvette métallique en croix.

La thermographie infrarouge est avant tout une technique de contrôle non destructif qui de ce fait trouve un intérêt particulier dans l'observation des milieux biologiques. L'imagerie thermique calculée à partir du flux infrarouge émis par le corps humain reflète l'état de santé d'un individu. Cependant, la peau étant opaque au-dessus de  $2\mu m$ , l'imagerie fonctionnelle en profondeur n'est accessible que via la diffusion de la chaleur au travers de l'épiderme. Nous avons développé des modèles thermiques simples où la veine est présentée comme un tube de chaleur en profondeur. Des sollicitations thermiques externes sur la peau permettent après un enregistrement des réponses infrarouges dynamiques par une caméra infrarouge à  $5mm$  de déduire le rayon, la profondeur de la veine ainsi que la vitesse du sang.

### 4.2.5.2 Imagerie infrarouge synchrone : mesure de la diffusivité thermique de matériaux

Lorsque les échantillons mesurés en radiométrie infrarouge sont le siège d'une excitation périodique, les échauffements induits seront composés d'une partie en synchronisme avec l'excitation et d'une partie à évolution lente et dissipative. Le rayonnement infrarouge émanant de la surface inspectée et représentatif des variations induites de température est capté par la caméra. Le module lock-in développé par CEDIP permet de calculer selon le principe de la détection synchrone, la phase et l'amplitude du phénomène physique à la fréquence de la sollicitation.

Il y a quelques années, le laboratoire a mis au point un instrument permettant de mesurer, à l'aide de la détection locale de l'émission infrarouge, le champ de température induit par un laser focalisé à la surface de l'échantillon et modulé en amplitude. La diffusivité thermique du matériau est extraite du profil de la phase du signal infrarouge, mesuré de part et d'autre du point de chauffe par détection synchrone. Récemment, le monodétecteur a été remplacé par une caméra infrarouge dont la matrice de détecteurs InSb ( $5\mu m$ ) permet de s'affranchir des déplacements micrométriques jusque là utilisés. La résolution spatiale ainsi obtenue est de l'ordre de  $40\mu m$ . La très bonne résolution thermique de la caméra, associée à un moyennage aisé en acquisition synchrone, accélère la procédure de mesure d'un facteur de 10 comparativement à une mesure effectuée par monodétecteur.

## 4.3 Instrumentation

### 4.3.1 Micro et nanomanipulations : sondes fluorescentes à balayage

*L. Aigouy, B. Samson, B. Dubertret*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [28, 29, 33, 35, 31, 32, 34, 30, 55, 100, 121, 126, 127]

Communications avec actes : [418, 419, 421, 420, 460, 459]

Communications sans actes : [506, 510, 509, 508, 507, 603, 602, 601]

Conférences invitées : [266]

Articles dans des revues sans comité de lecture : [253, 255, 254, 260]

Nous développons de nouvelles sondes SNOM utilisant des particules fluorescentes qui vont jouer le rôle de nanosources de lumière ou de nanodétecteurs de champ électromagnétique. Les particules, en silice ou verres fluorés, contiennent soit des ions de terres rares ( $\text{Er}^{3+}$  et  $\text{Yb}^{3+}$ ), soit des boîtes quantiques de CdSe/ZnS. La fabrication de ces sondes nécessite de manipuler de façon contrôlée des particules dont la taille est inférieure à 300nm. Nous avons donc développé un micro/nanomanipulateur permettant de fixer des nanoparticules à l'extrémité de pointes ultrafines mais aussi de pouvoir les manoeuvrer. Le système est composé de plusieurs systèmes de déplacements piézoélectriques placés sous un microscope permettant le contrôle en temps réel des opérations. Nous envisageons à l'avenir de manipuler des objets de dimension beaucoup plus réduite. Pour cela, des nanomanipulateurs seront placés dans un microscope électronique à balayage qui permettra l'observation et la manipulation d'objets jusqu'à quelques dizaines de nanomètres.

### 4.3.2 Microscope optique en champ proche et STM à rayonnement thermique

*P.-A. Lemoine, Y. De Wilde*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [101, 188, 544, 123, 55, 100]

Communications sans actes : [542, 545, 544, 538, 550, 552, 541, 542, 545, 539, 540, 535, 544, 536, 537, 538, 529, 530, 531, 532, 533, 534]

Conférences invitées : [316, 317, 314, 315, 308, 309, 310, 311, 312, 313]

Autres publications : [630, 626, 629]

Valorisations : [654, 653]

Collaborations nationales : Collaboration avec R. Colombelli, Institut d'électronique fondamentale (Orsay)

Collaborations internationales : Collaboration avec L. Wilson, Université de Sheffield (Royaume-Uni)

Contrats : ANR PNANO (2007) Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier résolue spatialement à l'échelle de 100 nm. Y. De Wilde (coordinateur).

Les microscopes optiques en champ proche à pointe diffusante (SNOM) permettent de réaliser des images optiques avec une résolution sublongueur d'onde dans une gamme spectrale étendue. L'idée du SNOM consiste à illuminer la pointe métallique d'un microscope à force atomique (AFM) et à enregistrer les variations d'intensité de lumière diffusée par celle-ci pendant qu'elle balaye la surface de l'échantillon. La plupart des SNOMs fonctionnent avec une source laser visible. Pour étendre le domaine des études accessibles en microscopie de champ proche, nous avons mis au point un nouveau SNOM qui fonctionne aussi bien dans le visible que dans l'infrarouge et qui peut être utilisé dans diverses configurations et dans divers environnements (air, liquides, . . .). Ce SNOM fonctionne par défaut avec une illumination laser externe. Deux modifications majeures ont récemment été apportées à la sonde. L'une permet d'imager le champ proche à la surface de microcircuits en fonctionnement, pour détecter par exemple le champ évanescent émis à la surface de lasers à cascade quantique fonctionnant dans l'infrarouge moyen. Ces dispositifs sont produits par nos collaborateurs de l'Institut d'électronique fondamentale (équipe de R. Colombelli). L'autre modification permet d'effectuer de l'imagerie de champ proche sans source laser en détectant dans l'infrarouge moyen le rayonnement thermique émis par l'échantillon lui-même, qui peut être stimulé à l'aide d'un élément de chauffage du support de l'échantillon. Nous avons baptisé la sonde de champ proche basée sur la détection du rayonnement thermique " le microscope à effet tunnel à rayonnement thermique " (TRSTM). Il permet de sonder la densité locale d'états électromagnétique à la surface d'un spécimen, comme le ferait un STM à photons.

### **4.3.3 Localisation latérale d'un véhicule automobile par bande magnétique**

*P. Santos, C. Filloy-Corbrion, D. Fournier, S. Holé, LISif-UMPC, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris*

Valorisations : [663]

Un système de prévention des sorties de route par approche coopérative entre le véhicule et la route a été développé. Ce système est basé sur la lecture de données codées sur une bande magnétique placée sur les voies de circulation. Le choix du magnétisme permet la localisation du centre de la route pour toutes conditions météorologiques ainsi que l'acquisition d'informations évolutives (signalisation routière, topographie de la route, informations temporaires (travaux par exemple), . . .).

Ce système a été testé sur une maquette à l'échelle réduite ainsi que sur une portion de route spécialement équipée pour l'occasion. Les résultats obtenus sont prometteurs avec notamment une précision de positionnement de l'ordre de 2 mm.

Un brevet a été déposé et une collaboration industrielle est en cours de négociation. Le dispositif nécessite cependant encore des études, notamment en ce qui concerne le véhicule de programmation de la bande, le codage des informations sur la bande et la di-

minution de la sensibilité des capteurs aux bruits magnétiques produits par la rotation des roues.

#### **4.3.4 Métrologie pour Virgo**

*V. Lorientte*

Articles dans des revues avec comité de lecture : [1, 2, 19, 27, 26, 24, 20, 21, 22, 25, 23, 14, 10, 11, 15, 16, 17, 12, 4, 6, 7, 8, 18, 13, 5, 3, 9, 58, 91, 174, 186, 187, 185, 184, 183, 247]

##### **4.3.4.1 Pourquoi une nouvelle métrologie ?**

Les efforts que nous avons déployés jusqu'à présent ont permis de caractériser avec la précision et la sensibilité requise les composants optiques de la première génération de détecteurs. Ils ont également aidé à l'amélioration des procédés de fabrication de la silice synthétique et de dépôt des revêtements multicouches réfléchissants et antireflet. Ces premiers instruments travaillent cependant aujourd'hui à leur limite de sensibilité, c'est particulièrement vrai pour les mesures de coefficients d'absorption. Deux problèmes se posent alors : comment mesurer des paramètres optiques avec une sensibilité et une précision bien meilleures que ce dont nous disposons actuellement, et quelle voie explorer en métrologie pour améliorer encore les performances des revêtements ? Pour fixer un ordre d'idées, chaque défaut d'un composant optique de Virgo (facteur d'absorption des revêtements, coefficient d'absorption de la silice, présence de défauts diffusants, biréfringence, etc. . .) entraîne aujourd'hui des pertes optiques inférieures à une partie par million. L'objectif est de réduire cette valeur d'un voire deux ordres de grandeur. Le seul moyen d'améliorer les performances (absorption, diffusion, biréfringence, etc. . .) des revêtements multicouches est aujourd'hui de disposer d'instruments capables non seulement de mesurer ces paramètres optiques, mais également d'en réaliser des cartographies tridimensionnelles et de sonder la structure des revêtements. Cette approche se heurte dès lors à une difficulté majeure, à savoir l'échelle caractéristique de la structure composée de couches d'épaisseur optique égale au quart de la longueur d'onde de travail, 1064nm. Cette difficulté, qui s'ajoute à celle de détecter des signaux extrêmement faibles, réduit les choix des techniques de mesures que nous pouvons mettre en oeuvre.

##### **4.3.4.2 Microscope confocal à lentille thermique (mesures d'absorption)**

Pour mesurer les propriétés d'absorption les méthodes photothermiques sont toujours les plus sensibles et on sait réaliser des mesures d'absorption avec une résolution spatiale latérale de l'ordre du micromètre. Nous avons développé un instrument capable de réaliser des mesures d'absorption résolues en profondeur avec une résolution axiale submicrométrique, comparable à celle des microscope confocaux classiques, et une sensibilité nous permettant d'atteindre des coefficients d'absorption de dix parties

par milliard. Nous avons construit cet instrument afin de déterminer les sources d'absorption dans les revêtements multicouches dans le but d'améliorer à terme les procédés de dépôt de ces revêtements. Plusieurs hypothèses sont envisageables pour expliquer la présence d'une absorption résiduelle de l'ordre d'une partie par million (ppm) dans les optiques de VIRGO. Cette absorption pourrait trouver son origine dans :

- \* Les interfaces entre les couches de SiO<sub>2</sub> et de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dont la nature chimique et l'organisation atomique sont mal connues.
- \* L'interface avec le substrat qui pourrait être contaminée par des résidus chimiques du polissage.
- \* Une absorption volumique des couches.
- \* La présence de défauts ponctuels absorbants d'origine inconnue.

Afin d'identifier la ou les véritables sources d'absorption, il faut un instrument capable de mesurer de très faibles niveaux d'absorption et avec la meilleure résolution en profondeur possible pour pouvoir étudier la structure fine du revêtement. La liste des techniques possibles pour mesurer de très faibles niveaux d'absorption est très restreinte. Une mesure directe de la transmission de l'échantillon est impossible pour des absorptions inférieures au pour cent. L'ellipsométrie permet des mesures relativement précises de la partie réelle de l'indice de réfraction mais se révèle beaucoup plus limitée pour la détermination de la partie imaginaire qui définit l'absorption. Les instruments actuels pour mesurer de très faibles niveaux d'absorption dans les optiques de VIRGO utilisent l'effet mirage. Mais la configuration classique ou deux faisceaux colinéaires pénètrent dans l'échantillon ne permet pas de discriminer en profondeur l'absorption dans l'échantillon car la zone d'interaction des deux faisceaux est large de plusieurs dizaines de microns. Afin de palier à ce problème nous avons développé un microscope à lentille thermique fonctionnant en configuration confocale qui combine la très grande sensibilité d'une mesure d'absorption par effet mirage à la résolution axiale d'un microscope confocal.

#### **4.3.4.3 Tomographie optique cohérente en lumière polarisée (mesures de diffusion)**

Une des sources de perte d'énergie dans VIRGO est la diffusion de la lumière par des défauts quasi ponctuels au sein des miroirs. Une étude précédente a montré l'absence de ce type de défauts dans les substrats et laisse donc penser que ces pertes par diffusions se concentrent dans les revêtements multicouches. Or la qualité des traitements réfléchissants des miroirs d'extrémités des bras de VIRGO ainsi que ceux des miroirs des cavités a un impact déterminant sur les performances de l'antenne gravitationnelle. Un ordre de grandeur de la taille critique de ces défauts pour les optiques de VIRGO est le tiers de la longueur d'onde, ce qui correspond à des particules de quelques centaines de nm de diamètre et des pertes par diffusion de 10<sup>-8</sup>. Notre objectif était donc de concevoir un instrument capable de détecter ces défauts et de les situer précisément dans l'empilement multicouches.

Une première tentative a consisté à observer les empilements multicouches avec un système de tomographie optique cohérente développé au laboratoire. Il s'agit d'un système



de microscopie permettant d'obtenir des images en profondeur d'un échantillon transparent. Pour ne pas être éblouis par les réflexions spéculaires, les échantillons étaient fortement inclinés afin de ne recueillir que la lumière diffusée à grands angles par les défauts présents dans le revêtement. Ce système avait l'inconvénient de réduire le champ d'observation à une ligne dans l'échantillon et les réflexions spéculaires n'étaient que partiellement éliminées. Ce premier essai nous a néanmoins conduit à développer un système de tomographie optique cohérente en lumière polarisée. La résolution axiale est obtenue grâce à la propriété de cohérence temporelle de la lumière et une combinaison d'éléments polarisants permet de travailler en 'fond noir' et ne garder que les signaux provenant des défauts dans l'échantillon.



## 5 Les perspectives scientifiques du Laboratoire Photons Et Matière

*Préambule : Nous décrivons succinctement dans ce document les perspectives scientifiques du LPEM pour les années à venir. Des informations beaucoup plus détaillées sont rassemblées dans le document "rapport d'activité" que nous avons fourni en 2006 pour le comité d'évaluation du CNRS, en particulier dans les parties introduction et conclusions. Ce rapport a été ajouté au présent dossier.*

### 5.1 Introduction

Grâce au dynamisme de ses chercheurs, et au recrutement de jeunes spécialistes ces dernières années, le LPEM a développé de nombreux axes de recherches nouveaux et prometteurs. Les quelques pages qui suivent donne une idée du foisonnement de projets qui caractérise l'activité du laboratoire. Il convient de noter que la plupart des recherches présentées ici font l'objet d'un financement contractuel, et ont été par conséquent évaluées par des instances extérieures, que ce soit l'ANR, le CNRS, la DGA, l'UPMC, les programmes CNano ou Cancéropôle de la région Ile de France . . . Ce soutien institutionnel reflète d'une part la qualité des projets, mais également l'adéquation entre ceux-ci et les grandes orientations scientifiques de nos tutelles, et en particulier du CNRS, qui vient de publier son plan stratégique pour les années à venir. On reconnaîtra ici sans peine les thèmes porteurs comme "nanosciences et nanotechnologies" et "images" explicitement mentionnés dans ce document, mais également la recherche très fondamentale effectuée notamment en physique de la matière condensée comme participant à l'effort "d'élargir le socle de connaissances", et le rôle central de "l'instrumentation" tel qu'il est décrit dans le plan stratégique.

Au-delà de l'évaluation "nationale" de ces projets au travers des appels d'offres, il est important de vérifier qu'ils ont une ambition au meilleur niveau international. La qualité des publications récentes attestent que la plupart des chercheurs du LPEM ont le souci d'être présents au meilleur niveau; les projets qui découlent de ces travaux, ou les nouvelles idées mises en oeuvre ont pour la majorité d'entre eux le potentiel nécessaire à une présence internationale du LPEM forte dans le futur.

Le croisement des cultures au sein du laboratoire est un facteur important pour l'émergence de projets vraiment novateurs, et qui peuvent conférer au LPEM un statut de pionnier. Nous pensons en particulier à l'étude du transport quantique dans des nanocristaux métalliques, à l'obtention d'images biologiques de haute qualité par la

combinaison de synthèse de nanocristaux qui ne "clignotent" pas et de nouvelles techniques d'imagerie 3D, l'utilisation du champ proche optique thermique pour étudier des dispositifs comme les lasers à cascades quantiques dans le domaine THz, et la mise en forme bio-inspirée de nanostructures pour la plasmonique . . . L'ambition du LPEM est de poursuivre cette transdisciplinarité à l'avenir. L'association avec l'INSERM et la participation au RTRA "FRTV" consacrent la diversification des activités vers les applications bio-médicales. Le recrutement d'un CR en commission 08 du CNRS ancre l'activité du laboratoire à l'interface entre la physique et l'ingénierie, en particulier dans le domaine émergent de la plasmonique.

Les grandes orientations de notre prospective reprennent les thématiques de notre rapport d'activité :

- Imagerie des milieux complexes. L'accent est mis de plus en plus sur l'imagerie bio-médicale. En plus du travail déjà engagé sur le couplage de l'optique et des ultra-sons, les études incorporant de nouveaux nanocristaux pour imager seront développées (optique non-linéaire, deux photons, FRET . . .), ainsi que celles qui utilisent les exaltations locales de champ dans des nanostructures. Le "contrôle des ondes" sera aussi au coeur des travaux futurs : comment contrôler le front d'onde dans des milieux fortement diffusants et/ou absorbants pour imager des tissus biologiques ou des nanostructures ?

- Electrons en interactions. En complément des études très importantes des ordres électroniques dans des systèmes de fermions fortement corrélés qu'il faut poursuivre vu l'impact des acteurs du LPEM dans ce domaine, plusieurs approches nouvelles sont envisagées pour ce thème. La réalisation de nanostructures à bases de nanocristaux ou de couches minces d'oxydes ouvre la voie à des études très importantes sur les transitions quantiques de systèmes électroniques confinés. De même, l'utilisation de champs magnétiques très intenses sur des semi-métaux comme le bismuth permettra d'accéder au régime ultra-quantique. Des applications pour l'électronique cryogénique et la spintronique seront développées.

- Nanophysique, nanostructures et nano-matériaux. Ce thème irradie une grande partie de l'activité du laboratoire, et le développement de nouveaux outils de champ proche (nano-sondes fluorescentes, mesure de la densité électromagnétique locale, THz sub longueur d'onde . . .) sera un axe prioritaire du LPEM. La physique des nanostructures (électronique, optique-plasmonique, thermique . . .) basée sur de nouvelles réalisations originales sera également étudiée.

Certains outils relativement matures issus du travail antérieur du laboratoire seront utilisés à des fins de caractérisation de matériaux et/ou de dispositifs, en partenariat parfois serré avec des entreprises. Ceci conjugué à la prise de brevets montre que le laboratoire a le souci d'accompagner la recherche jusqu'au monde industriel, qu'il s'agisse de grandes entreprises ou de start-up.

Pour se concentrer sur ces problématiques, certaines activités antérieures s'arrêtent : on peut citer par exemple : le stockage 3D de l'information dans des matériaux photoréfractifs, l'effet de proximité ferromagnétique/supraconducteur, ou les études en microscopie électronique à balayage des affections de l'œil.

Le LPEM est fortement impliqué dans un réseau dense de collaborations. Au cours des prochaines années, les collaborations locales avec d'autres laboratoires de l'ESPCI se renforceront, en particulier dans le domaine du contrôle des ondes, de la super-résolution, de la plasmonique et du couplage optique-US, avec le recrutement d'un professeur ESPCI théoricien, mais également dans celui de la biologie et de la caractérisation des matériaux, avec des équipements communs. Le RTRA "FRTV" renforcera naturellement les liens avec l'Institut Curie et l'ENS. Plus généralement, l'implication du LPEM dans des programmes avec les laboratoires de la Montagne Sainte Geneviève et de l'UPMC ira croissant, notamment en ce qui concerne les thèmes liés à la nanophysique, aux matériaux, et aux électrons en interaction. Dès et déjà, plusieurs collaborations internationales nouvelles sont engagées qu'il serait trop long de lister ici. Cet aspect sera amplifié dans les années à venir.

La liste des équipements importants que l'on envisage d'acquérir est fournie dans les tableaux adéquats. Nous souhaitons ici indiquer les grandes lignes de notre politique de recrutement. Bien entendu, les trois thèmes principaux sont amenés à se développer et à recruter. Soulignons cependant quelques aspects spécifiques :

- les nouveaux développements dans le domaine de l'instrumentation bio-médicale, et en particulier le couplage avec la plasmonique sont importants pour la recherche, mais également pour les enseignements dans lesquels le LPEM est impliqué. Un recrutement ou une promotion "professeur" serait nécessaire.

- la spectroscopie des systèmes de fermions en interaction est une activité de notre laboratoire qu'il convient de renforcer.

- les développements de nouveaux instruments en champ proche pour étudier la physique des nanostructures est un point fort du LPEM qu'il faut soutenir par un recrutement.

- trois "seniors" partiront à la retraite au cours de ce quadriennal.

- le LPEM comprend de jeunes scientifiques de très grande valeur, et il faudra veiller à leur promotion dans les rangs A (DR et Professeurs).

- l'instrumentation optique de pointe du LPEM ne pourra rester compétitive sans un renforcement de notre personnel technique (IR) dans ce domaine

Pour conclure, nous souhaitons rappeler ici pourquoi nous souhaitons adopter un nouveau statut : Unité Mixte ESPCI-UPMC-CNRS- INSERM. Il s'agit principalement de consacrer la réalité de notre activité aujourd'hui. L'ESPCI nous héberge, fournit une dizaine d'enseignants-chercheurs, contribue financièrement au développement du laboratoire et surtout assure un environnement scientifique locale pluridisciplinaire très favorable à notre activité. Nous sommes très engagés avec l'UPMC par la recherche et l'enseignement à tous les niveaux (du L1 au M2). Le CNRS est un partenaire essentiel : il fournit la majorité des permanents du LPEM, soutient financièrement l'activité et permet de réaliser des partenariats scientifiques et institutionnels avec d'autres laboratoires. Enfin, l'essor important de la recherche dans le domaine bio-médical justifie notre association avec l'INSERM. Cette demande de formation d'une UM a été recommandée par deux comités d'évaluations du CNRS successifs, et est soutenue par la

## 5.2 Ondes en milieu complexe et imagerie bio-médicale

### 5.2.1 Introduction

Le laboratoire a développé des outils expérimentaux travaillant aux *limites physiques*, pour la réalisation d'images représentant une distribution des propriétés physiques locales : les imageries thermique, de microscopie interférométrique, et de biréfringence sont des images 2D alors que plus récemment la *tomographie optique cohérente*, *l'imagerie des tissus par interaction acousto-optique* ou *par utilisation de nanosondes* permettent une exploration 3D des échantillons. Ce sont ces derniers sujets qui constituent le cœur de l'activité biomédicale et des projets dont nous parlerons ici.

*Le cadre et les défis* : Le contraste optique dans l'examen du vivant est porteur d'informations à caractère morphologique et/ou fonctionnel. Les recherches menées depuis 8 ans au laboratoire visent à donner les outils nécessaires pour révéler ces contrastes à des échelles spatiales très différentes allant de quelques cm à quelques nm malgré la forte diffusion des tissus et les distorsions du front d'onde par le milieu aberrateur que constituent les tissus vivants.

#### *Le contrôle des ondes et nos projets de recherches*

Bien que les ondes du domaine optique ne soient pas aussi manipulables que les ondes millimétriques ou les ondes ultrasonores pour lesquelles des récepteurs-émetteurs du champ existent, il est possible néanmoins de penser à plusieurs moyens de contrôler le front d'onde dans le domaine visible et proche IR. *L'optique adaptative* est abondamment utilisée en astronomie grâce aux miroirs déformables ; nous l'associerons à l'OCT (Optical Coherent Tomography) qui sera ici la sonde du champ électromagnétique. Nous utilisons déjà les *matériaux photoréfractifs* pour synthétiser un front d'onde complexe marqué par des ultra-sons. Nous chercherons à *engendrer des fronts d'onde conjugués par holographie en temps réel* et testerons la résistance de ce quasi renversement du temps à l'absorption et aux effets d'ouverture. L'utilisation de matrices de cristaux liquides permet le contrôle du front d'onde en amplitude, phase et polarisation : nous les utilisons pour la superrésolution et tenterons d'étendre leur usage à un champ de speckle. L'acoustique nous inspire et nous aide dans nos approches. C'est ainsi que la combinaison *phototoacoustique-renversement du temps en acoustique* peut potentiellement aider l'imagerie et la thérapie acoustique.

#### *Les nanosondes*

Le développement de nanosondes métalliques ou semi-conductrices fluorescentes est un enjeu majeur aujourd'hui, pour le développement de nouvelles techniques d'imageries biomédicales. Le laboratoire s'est lancé récemment dans la synthèse et l'encapsulation de nanocristaux (Quantum Dots), et leur couplage avec des systèmes biologiques

## 5.2.2 Tomographie optique cohérente : OCT et optique adaptative

Lorsque l'observation des tissus doit se faire à faible profondeur ( $\sim 1mm$ ) on peut envisager de sélectionner les photons dits "balistiques" qui fournissent une image de très bonne qualité lorsque on les "isole" des photons diffusés par l'interférométrie à faible longueur de cohérence. Nous avons proposé de coupler cette méthode à l'optique adaptative pour l'examen de la rétine, pour corriger des aberrations de l'œil, et pris un brevet sur ce sujet. Dans ce cas une sorte d'étoile artificielle est créée sur la rétine.

Aujourd'hui nous souhaitons imager dans la profondeur des tissus pour aider au diagnostic des mélanomes et pour d'autres examens dermatologiques. Un des problèmes est la distorsion importante du front d'onde à la traversée des tissus qui sont non seulement diffusants mais aberrateurs. Un des problèmes est que nous ne disposons pas de référence comme l'étoile artificielle : une solution proposée récemment consiste à utiliser le signal d'OCT au niveau de la pupille comme analyse du front d'onde. C'est la validité de cette approche en OCT plein champ (en face) que nous souhaitons mettre au point et coupler à un système de correction du front d'onde. Le bénéfice attendu est non seulement un gain en résolution mais surtout un gain en rapport signal-sur-bruit car la perte de cohérence spatiale induit une perte associée du niveau du signal. (ANR MIKADO, début 2008)

## 5.2.3 Imagerie par couplage de la lumière et des ultra-sons (US)

Il s'agit de développer de nouvelles méthodes d'imagerie des milieux complexes, et en particulier des tissus biologiques sur des dimensions de l'ordre de quelques cm avec une résolution millimétrique, en combinant optique et acoustique (projets financés dans le cadre du Cancéropôle d'IdF, du BQR UPMC et par les crédits d'intervention du MPPU-CNRS). En parallèle du développement de la technique acousto-optique, permettant d'obtenir une information sur l'absorption optique avec la résolution, nous étudions plusieurs autres approches combinant la lumière et les ultrasons dans les tissus :

### 5.2.3.1 L'approche par "opto-élastographie"

Elle repose d'une part sur un effet physique différent de la modulation acousto-optique, mais permet d'autre part d'obtenir, en plus de l'information sur l'absorption, une information sur la "dureté" du milieu (module d'Young). L'enjeu est donc une caractérisation optique et élastique d'un tissu, qui reste à évaluer au regard des approches acousto-optique d'élastographie "conventionnelles" (par IRM ou par ultrasons).

### 5.2.3.2 Retournement temporel d'ondes photoacoustiques

En couplant deux méthodes développées dans deux communautés différentes (imagerie photo-acoustique et renversement temporel d'ondes ultrasonore), nous développons une nouvelle méthode de focalisation automatique des ultrasons vers un contraste d'ab-

sorption optique. Nous souhaitons en particulier appliquer cette méthode pour le guidage par onde photo-acoustique de faisceau de thérapie ultrasonore.

Ces deux approches a conduit à la réalisation d'expérience de principe sur des gels, et nous souhaitons à présent développer les applications de ces approches aux tissus biologiques (modélisation, développements méthodologiques et instrumentaux). Ces approches se font en collaboration étroite avec le Laboratoire Ondes et Acoustique de l'ESPCI. Un projet d'ANR Jeunes Chercheurs/Jeunes Chercheuses (PAG HIFU d'E. Bossy) a été accepté en 2007, qui se propose d'utiliser le retournement temporel d'ondes photoacoustiques pour le guidage de la thérapie ultrasonore. Un projet Européen (ERC) vient d'être favorablement noté, et un consortium avec l'université de Twente vient d'être créé sur ces sujets.

### 5.2.3.3 Holographie rapide par adaptation du front d'onde

Le signal acousto-optique est très faible (quelques nWatt) dès lors que les échantillons font plusieurs centimètres d'épaisseur; il est de plus sur un fond continu important (fraction de mWatt). L'originalité de la mesure réside essentiellement sur sa rapidité, de nombreuses options sont en cours de développement tant au niveau de la détection (photodétecteurs, carte d'acquisition) que des configurations optiques, ainsi que la mesure des caractéristiques de bruit du montage en utilisant des échantillons calibrés.

Nous disposons à l'heure actuelle de cristaux d'AsGa, qui imposent un fonctionnement à  $1064nm$ , qui n'est sans doute pas la zone spectrale la plus pertinente pour détecter les tumeurs. Nous destinons cette longueur d'onde au suivi de thérapie par hyperthermie, et envisageons en parallèle d'étendre la méthode dans la zone  $700 - 900nm$ . Quelques cristaux répondent aux critères évoqués plus haut, notamment des cristaux de  $ZnTe : V, Mn$ . Nous entamons depuis peu une collaboration avec un fabricant de tels cristaux et avons reçu quelques échantillons tests.

Le mode d'application des ultrasons doit être développé en impulsion et/ou codage de phase aléatoire, afin de respecter les normes médicales et obtenir une résolution du signal le long de la propagation des ultrasons, par analogie avec ce qui a été engagé en holographie numérique.

Ce montage adaptif permet l'interférence de fronts d'onde speckle. La configuration photoréfractive actuelle est dite de transfert d'énergie. On peut aussi l'envisager en termes de diffraction anisotrope. Cette dernière limiterait le bruit lié au flux parasite de la pompe tout en gardant une efficacité raisonnable. Une autre voie, encore inexploree, permettrait d'effectuer un miroir à conjugaison de phase (mélange à quatre ondes) sur les photons marqués : le faisceau généré, bien que plus faible car se propageant deux fois dans le milieu, aurait cependant une bien meilleure cohérence spatiale, et l'on pourrait collecter plus efficacement le flux sur le détecteur. Cette idée peut s'envisager en utilisant des milieux lasers pompés (réseaux de gain) qui permettent d'obtenir un miroir à conjugaison de phase avec une réflectivité supérieure à celle existant par effet photoréfractif. Nous projetons également d'utiliser nos cristaux photoréfractifs pour



créer un mode de détection dédié à l'imagerie par élastographie, en effectuant une mesure de dégradation de la figure de speckle au passage de l'onde de cisaillement.

Ces travaux se feront en collaboration avec le laboratoire Ondes et Acoustique de l'ESPCI/CNRS/ INSERM sur le développement de méthodes combinant acoustique et optique. Le laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique par l'intermédiaire de Philippe Delaye demeure un de nos partenaires privilégiés, ainsi que Michel Gross au Laboratoire Kastler-Brossel de l'Ecole Normale Supérieure. Des contacts ont récemment été pris avec Jean-Pierre Huignard et Arnaud Brignon, qui travaillent dans le département de Physique de Thalès Research Technology sur le campus Polytechnique.

## 5.2.4 Nanosondes pour l'imagerie biomédicale super-résolue

Un certain nombre de nouvelles techniques d'imagerie bio-médicale passe par la mise au point de sondes spécifiques bio-compatibles, en particulier les nanocristaux. C'est pourquoi une intense activité de synthèse de nanocristaux s'est développée récemment au laboratoire. La maîtrise de la chimie de surface et l'encapsulation sont deux points de passage obligés pour utiliser de façon fiable et courante les nanocristaux dans le contexte de l'imagerie biomédicale. Un effort particulier est mis aujourd'hui sur la synthèse de nanocristaux semi-conducteurs pour leurs propriétés de fluorescence très bien contrôlées, mais la synthèse de nanocristaux métalliques est également abordée. Ces derniers sont utilisés à des fins d'imagerie, mais également pour l'étude de structures métalliques artificielles (cf le thème "Electrons en interaction"). La mise au point d'imagerie optique super-résolue (en dessous de la limite de diffraction) est intimement couplée au développement de ces sondes.

### 5.2.4.1 Synthèse de nanocristaux bio-compatibles pour la microscopie super-résolue

Notre objectif est la compréhension profonde de la fabrication et des propriétés physico-chimiques des objets inorganiques de taille nanométrique, qu'ils s'appliquent à l'imagerie biomédicale, au développement de nouvelles techniques de microscopie, ou à la biotechnologie. L'ensemble de ces activités ont été soutenues dans le cadre d'ANR (VISEN, ARTAMIS, MKT : "dot imageur"), d'un projet "Human Frontier of Science", d'un financement Sesame IdF et d'une thèse DGA.

La synthèse de nanocristaux basés sur le matériau CdTe permettra d'obtenir des sondes fluorescentes émettant dans le proche infrarouge ( $\approx 800nm$ ), donc particulièrement adaptées à l'imagerie des tissus en profondeur et *in vivo*. Malheureusement, cette synthèse est bien moins maîtrisée que celle de nanocristaux à base de CdSe émettant dans le visible ( $\approx 500 - 650nm$ ). Le matériau CdTe est en effet peu stable, s'oxyde rapidement et les synthèses actuelles ne permettent pas d'obtenir de nanocristaux brillants et monodisperses émettant dans la plage infra-rouge désirée. En s'appuyant sur la compréhension des mécanismes de synthèse des nanocristaux CdSe, nous développerons de nouvelles synthèses dans le but d'étendre la plage d'émission des nanocristaux au proche infra-rouge ( $> 750nm$ ) et d'obtenir des nanocristaux plus stables. Pour cela, nous

développerons la croissance de coques de matériaux à plus forte bande interdite autour des cœurs CdTe, et explorerons l'utilisation d'alliages tels que CdSeTe ainsi que la synthèse de nanocristaux de type II tels CdTe/CdSe. Nous développerons également la synthèse de nanocristaux III-V tels InP, InAs, ne comportant pas de métaux lourds et donc présentant une meilleure biocompatibilité que les nanocristaux II-VI couramment utilisés. Pour l'ensemble de ces travaux, la caractérisation par microscopie électronique à balayage (TEM) sera un point clef. Les performances du TEM du LPEM permettent en effet d'imager les nanocristaux, mais également d'analyser très finement leur composition chimique.

Nous maîtrisons actuellement l'encapsulation des nanocristaux à cœur de CdSe dans des micelles de polymères amphiphiles afin de les rendre solubles dans l'eau et d'empêcher leur adsorption non spécifique dans les milieux biologiques. Nous sommes également capables de greffer à leur surface différentes biomolécules (ADN, anticorps. . .) qui permettront de marquer spécifiquement des protéines d'intérêt dans l'étude de phénomènes intracellulaires ou membranaires, ou encore de cibler des cellules cancéreuses chez le petit animal. Le suivi de ces sondes spécifiques sera réalisé grâce au microscope 3D super-résolu développé au sein du laboratoire et spécialement adapté à la détection des nanocristaux.

#### 5.2.4.2 Synthèse de sondes multimodales pour l'imagerie in-vivo

Nous synthétisons également de nouvelles sondes à la fois magnétiques et fluorescentes en couplant, à l'échelle colloïdale, les nanocristaux à des sondes magnétiques réalisées au laboratoire LI2C (UMR 7612) qui possède une expertise dans la synthèse de nanoparticules d'oxyde de fer de type maghémite  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Un microscope de fluorescence à modulation du plan de mise au point permettra de localiser ces sondes dans les trois dimensions avec une précision nanométrique et d'obtenir une cartographie à haute résolution des propriétés mécaniques de membranes cellulaires. Enfin, nous projetons de développer le couplage entre nanocristaux de semi-conducteurs fluorescents et isotopes radioactifs pour obtenir des sondes multimodales. Une collaboration déjà active avec le Service Hospitalier Frédéric Joliot nous a permis de démontrer que l'obtention de telles sondes était réalisable. Nous utiliserons ces sondes afin d'étudier la biodistribution *in vivo* des nanocristaux chez le petit animal, et d'obtenir une méthode d'imagerie multi-échelle en corps entier et à l'échelle sub-cellulaire dans des régions d'intérêt. Ces études permettront en outre de développer des chimies de surface efficaces pour une longue circulation des nanocristaux dans le système sanguin et une meilleure élimination de l'organisme, ainsi que leur fonctionnalisation pour le ciblage spécifique *in vivo*.

Afin d'ajouter un degré d'information au suivi spatio-temporel de nos sondes, nous développerons des nanocristaux sensibles à l'environnement afin de mesurer localement des paramètres tels que le pH ou la température, ou encore la concentration d'une molécule (par exemple le calcium). Le couplage de particules métalliques (or, argent) aux nanocristaux de semiconducteurs permettront le développement de ces nouvelles sondes fonctionnelles. En effet, les nanoparticules d'or en particulier permettent une extinction

efficace de la fluorescence des nanocristaux de semiconducteurs dépendant de la distance de séparation entre ces particules. L'étude de conjugués NC-nanoparticules d'or permettra tout d'abord une meilleure compréhension de la nature du couplage entre ces deux types de nanoparticules. L'utilisation pour coupler ces deux nanoparticules entre elles de biomolécules dont la géométrie change avec l'environnement permettra alors de sonder celui-ci via des variations d'intensité ou de longueur d'onde d'émission de fluorescence.

#### **5.2.4.3 Nanosondes et illumination structurée**

L'imagerie de fluorescence est un outil majeur pour la biophysique, la biologie et la médecine qui permet d'obtenir des informations sur la distribution spatiale de molécules ainsi que sur son évolution temporelle. Cependant, les techniques actuelles présentent des limites au niveau d'une part des techniques d'imagerie (rapidité d'acquisition, résolution spatiale) et d'autre part des sondes employées (photo-stabilité des colorants, capacité de multiplexage). La conception de méthodes d'imagerie performantes nécessite donc le développement parallèle de ces deux aspects. Ce projet propose de développer deux méthodes d'imagerie performantes, l'une offrant une imagerie fonctionnelle rapide à haute résolution par illumination structurée, l'autre une imagerie multicolore capable de détecter de nombreux signaux simultanément, en utilisant de nouvelles techniques d'instrumentation optiques ainsi que des sondes fluorescentes fonctionnelles basées sur les nanocristaux de semi-conducteur.

L'illumination structurée 3D, qui permet de réaliser un codage axial dans des échantillons épais, voit ses performances fortement limitées par les aberrations introduites par les inhomogénéités d'indice des échantillons. Le contrôle et la remise en forme des fronts d'onde, à l'illumination et à la détection, semblent être des aspects incontournables qu'il faudra développer et mettre en place rapidement, faute de quoi il ne sera certainement pas possible de pousser très loin la microscopie 3D. Nous ne sous-estimons pas les difficultés que nous allons rencontrer, l'optique adaptative et le contrôle des fronts d'onde sont des techniques délicates, et les contraintes supplémentaires liées au fait qu'il faudra les mettre en œuvre dans des systèmes de microscopie d'échantillons biologiques rendront la tâche certainement très difficile (projet soutenu par MPPU-CNRS).

#### **5.2.4.4 Détection optique de nano objets métalliques**

Les nanoobjets métalliques sont devenus des outils qui seront dans un proche avenir utilisés en thérapie pour le traitement du cancer. Il est donc fondamental de pouvoir non seulement les imager mais aussi d'en appréhender leurs propriétés thermiques à des fins thérapeutiques.

L'expérience de notre laboratoire dans le domaine des techniques photothermiques, alliée aux développements effectués au LKB en holographie numérique nous ont permis d'initier le développement d'un instrument original et performant. Deux directions d'évolution sont envisagées pour cette thématique émergente : d'une part, la poursuite des

développements instrumentaux et des applications à la mesure physique (thermique essentiellement), d'autre part une adaptation du montage à des applications biologiques. L'holographie numérique hétérodyne permet la mesure et la reconstruction du champ total rayonné par des nano objets. Dans le contexte de l'ANR EThNA, la possibilité d'accéder à des diagrammes de rayonnement 3D sera précieuse pour la compréhension des mécanismes de transfert radiatif entre particules en matrice solide. Par ailleurs, la possibilité de mesurer en volume le déphasage optique lié à la variation d'indice en présence d'un échauffement devrait permettre d'obtenir des cartographies 3D de champs de température, qu'aucune technique actuelle ne permet d'obtenir. Ce travail est complémentaire de celui que nous faisons dans le cadre de l'ANR NANOTHERMOFLUO sur la caractérisation de nanosondes thermiques.

Dans un contexte biologique (ANR 3DNANOBIODELL), la détection d'objets relativement gros ( $100nm$ ) permettent déjà d'envisager des applications, prévues prochainement avec l'équipe de M. Coppey-Moisan (Institut Jacques Monod) : il devrait être possible de suivre les déformations de parois cellulaires avec l'instrument développé. Au-delà, des tailles de l'ordre de  $30nm$ , déjà observables à l'aide de notre montage, doit permettre le suivi de la communication entre cytoplasme et noyau, puisque celle-ci s'effectue via des pores d'un diamètre de l'ordre de  $45nm$ . Enfin, le suivi de la dynamique des récepteurs membranaires au niveau de l'espace synaptique nécessite des sondes plus petites que la dimension de cette fente, soit  $10$  à  $40nm$ . Ces différents types d'études semblent à la portée des performances attendues pour notre montage, moyennant la poursuite de l'effort instrumental actuel.

## 5.2.5 Puces à ADN

La mesure rapide de réactions basées sur la présence d'ADN spécifique est un enjeu majeur de la recherche médicale aujourd'hui. Le LPEM contribue à cet effort avec deux approches, l'une basée sur l'optique plasmonique, l'autre sur la nano-mécanique.

### 5.2.5.1 Imagerie plasmonique biomédicale

L'idée de base de ce projet est d'utiliser l'exaltation du champ électromagnétique au voisinage de nanostructures métalliques, pour imager efficacement des sondes fluorescentes. Avec le Laboratoire de Neurobiologie de l'ESPCI (V. Studer) et le MPQ de Paris VII (E. Fort), nous avons proposé un projet de plateforme d'utilisation des techniques de la plasmonique afin d'améliorer la sensibilité de l'imagerie bio-médicale. Le projet a été accepté par la région Ile de France, et nous installons une salle dédiée à ce type d'imagerie à l'ESPCI. Dans ce projet, l'apport principal du LPEM est la coordination pour la partie optique, et la caractérisation champ proche pour tout ce qui est échantillon plasmonique à exaltation de champs.

### 5.2.5.2 Nanomécanique pour la détection d'ADN

Le savoir faire du laboratoire pour la détection de très faibles déplacements, nous a conduit il ya quelques années à nous intéresser aux techniques de microlaboratoire et en particulier aux puces à ADN. Cette étude nous a entraîné vers des études très fines du comportement mécanique des microleviers et a donné lieu à une thèse cohabilitée avec le LMT (ENS Cachan)

En collaboration avec ce laboratoire, nous poursuivrons, l'étude du comportement mécanique des microsystèmes en interaction avec leur environnement. Afin d'améliorer la fiabilité et la qualité de l'identification nous nous attacherons à enrichir l'information expérimentale sur le chargement. L'adjonction d'une autre technique de caractérisation : imagerie d'électroréflectance dans le cas du couplage électro-élastique, et imagerie ellipsométrique dans l'étude des cinétiques d'adsorption de dépôts chimiques ou biologiques, pourrait apporter de nouvelles données sur la distribution du chargement et renforcer les performances de l'identification de la nature du chargement et des propriétés élastiques.

Nous envisageons par ailleurs de valider nos méthodes d'imagerie et d'analyse par des mesures sur des leviers dont les surfaces seraient fonctionnalisées localement, par tamponnage ou à l'aide de microélectrodes (collaboration LECA), suivant des motifs définis.

### 5.2.6 Relaxation RMN à bas champ

Dans le cadre de la Fondation de Recherche Transdisciplinaire du Vivant (FRTV), une nouvelle équipe d'instrumentation RMN a été créée et soutenue financièrement par l'ESPCI. Cette équipe est composée de chercheurs et d'enseignants-chercheurs possédant des compétences complémentaires en instrumentation ou en physique quantique (et tout particulièrement en SQUID).

Cette équipe a pour but de développer un système de RMN à bas champ, c'est-à-dire pour des champs de relaxation inférieurs à  $10mT$ . La relaxation peut par exemple se faire dans le champ terrestre à  $47\mu T$ . Comparés aux  $1.5T$  utilisés dans un système d'imagerie médicale RMN conventionnelle, l'utilisation de faibles champs de relaxation permet notamment de différencier très efficacement les cellules bénignes des cellules malignes. De même, la mesure du couplage  $J$ , interaction entre les spins voisins, n'est possible qu'à bas champ car complètement masquée à fort champ. Par ailleurs, l'homogénéité du champ de relaxation est un paramètre crucial pour la qualité des mesures obtenues et cette homogénéité est beaucoup plus facile à obtenir à bas champ qu'à fort champ avec des systèmes moins encombrants et moins onéreux. Enfin, l'utilisation de bas champ offre la possibilité de réaliser une analyse chimique ou une image du contenu d'un récipient métallique non magnétique fermé de façon non invasive.

Deux systèmes de RMN bas champ vont être développés.

Le premier utilisera les SQUIDs à haute température critique développés au sein de l'UPR. Les SQUIDs sont des capteurs de flux magnétique extrêmement sensibles et donc

particulièrement bien adaptés aux mesures RMN à très bas champ. Les SQUIDs développés au sein de l'UPR peuvent être réalisés avec une très grande reproductibilité ce qui permet leur association en réseau et l'obtention de systèmes d'imagerie innovants. L'imagerie médicale est l'application visée.

Le deuxième système utilisera des bobines "classiques" de détection. Ce système ne nécessite pas de cryogénie et sera par conséquent très peu onéreux et particulièrement bien adapté au monde industriel. Les applications visées sont alors la détection de personnes, l'analyse chimique dont la recherche d'explosifs.

## 5.3 Electrons en interactions

### 5.3.1 Introduction

La physique des solides aujourd'hui est face à un défi important nous semble-t-il : comment comprendre le comportement des matériaux dans lesquels se manifestent de fortes interactions électroniques? Les théories perturbatives "à la Landau" ne sont plus opérantes. L'état fondamental n'est pas connu dès qu'on s'éloigne de l'isolant pur (très souvent un isolant de Mott). En fait, doper ces systèmes revient à introduire des charges dans un système où les interactions électroniques sont peu ou pas écrantées, les fluctuations et/ou ordres de spin très présents. Ainsi le diagramme de phase devient complexe, avec de multiples ordres en compétition ou en coopération : des transitions quantiques peuvent apparaître, des séparations spatiales de phase également. Ceci est vrai par exemple dans les matériaux supraconducteurs (oxydes de cuivre, ruthénates, organiques) et des oxydes de métaux de transition. Le LPEM a contribué de façon significative à cette problématique au niveau international, et continuera de travailler en ce sens à l'avenir. Mais plus généralement une activité importante demeure dans le domaine des matériaux exotiques comme les fermions lourds qui présentent également un diagramme de phase très riche. Enfin l'avènement des nanotechnologies permet de réaliser des structures hybrides sophistiquées grâce auxquelles on peut étudier la compétition entre ordres quantiques comme par exemple magnétisme et supraconductivité, ou bien réaliser des nanostructures dont les tailles caractéristiques sont pertinentes pour la physique des phénomènes concernés (longueur de cohérence supraconductrice, libre parcours moyen élastique ou inélastique, longueur de pénétration du champ, domaines magnétiques ...).

Une autre thématique en émergence est l'étude de systèmes électroniques de basse dimension : des transitions de phases apparaissent (transition métal-isolant, transition supra-isolant) et les fluctuations jouent un rôle déterminant. Des études importantes sont entamées, grâce à des mesures thermoélectriques, de transport électronique DC ou haute fréquence, de susceptibilité magnétique ... L'étude du Bismuth sous très fort champ magnétique sera poursuivie. Une physique extrêmement nouvelle et inattendue se développe dans ce composé semi-métallique anisotrope.

Enfin, des applications voient le jour, dans le domaine de l'électronique cryogénique

et de la spintronique.

## 5.3.2 Etude des oxydes

### 5.3.2.1 Diagramme de phase des cuprates

La phase sous-dopée des cuprates continue de retenir notre attention. Plusieurs types d'expériences seront menés.

Tout d'abord, la transition supraconducteur-isolant sous très fort champ magnétique sera étudiée dans les systèmes YBCO et LSCO sous dopés en collaboration avec l'université de Louvain, pour travailler avec des champs pulsés de l'ordre d'une cinquantaine de teslas qui permettent de supprimer la supraconductivité dans ces composés. Ensuite, nous chercherons à mettre en évidence une transition de phase à haute température qui délimiterait la phase de pseudogap, grâce à des mesures ultra-fines de susceptibilité alternative. La phase basse température pourrait briser la symétrie par renversement du temps et la symétrie d'inversion.

D'autres expériences seront menées, en particulier par spectroscopie optique, pour répondre aux questions suivantes (ANR GAPSUPRA) :

Pourquoi deux systèmes très similaires comme *Hg1201* et *Bi2201* ont des  $T_c$  maximum aussi différentes (94K et 20K)? Que pouvons nous apprendre sur l'état normal à basse température (*Bi2201*)? Est-ce que l'effet du désordre fait baisser  $T_c$ ? Cette question peut-être posée comme : Est-ce que les cuprates au Bi seraient des supraconducteurs à très haute  $T_c$  s'ils n'étaient pas désordonnés?

Les cuprates dopés aux électrons seront également étudiés. L'idée est de faire le lien entre l'ordre magnétique observée par neutrons, le gap normal vu en optique et les mesures de magnéto-transport. Les points ouverts sont : (i) Nous observons la supraconductivité et un ordre antiferromagnétique dans le même échantillon. Est-ce que la phase supraconductrice coexiste avec un ordre antiferromagnétique ou est-ce plutôt une séparation de phases? (ii) Est-ce que nous avons vraiment un ordre antiferromagnétique à longue portée ou sont-ce seulement des fluctuations? (iii) Est-ce que nous avons un ordre à longue portée dans les échantillons non supraconducteurs et seulement des fluctuations antiferromagnétiques dans ceux qui sont supraconducteurs?

En complément de ces mesures macroscopiques, nous souhaitons étudier les séparations de phases (stripes, domaines ferromagnétique ou antiferromagnétique ...) dans les systèmes électroniques fortement corrélés (cuprates, manganites), en réalisant des nanostructures (échelle caractéristique de ces phénomènes) dans ces composés, et mesurer les propriétés de transport électronique et réaliser éventuellement des mesures de spectroscopie électronique locale.

### 5.3.2.2 Etude des manganites

Comme nous l'avons déjà mentionné, les manganites présentent également un diagramme de phases très riche. Dans les systèmes fortement corrélés, la compétition entre

différentes phases se retrouvent dans les propriétés électroniques de façons très variées. On observe ainsi dans les diagrammes de phases la présence de supraconductivité et de divers ordres de charges et de spins. Ces ordres peuvent se manifester à longue portée ou à courte portée et peuvent parfois même coexister spatialement. Dans certaines manganites, cette compétition se manifeste de façon spectaculaire par une séparation de phase autour de la transition isolant-métal. Nous nous proposons d'identifier la manifestation de ces compétitions de phases à différentes échelles. Tout d'abord de façon microscopique, en utilisant une nouvelle technique permettant de créer des nanofils, il devient possible d'étudier ces systèmes fortement corrélés à des tailles comparables à l'échelle spatiale des fluctuations ; à des échelles macroscopiques, par spectroscopie infrarouge, afin d'identifier les conséquences de ces fluctuations à grande échelle.

La RMN de l'oxygène 17 sera utilisée pour sonder localement ces inhomogénéités. Cette sonde est particulièrement intéressante puisqu'elle permet d'identifier différents ordres électroniques (charges, spin, orbitales . . .).

### **5.3.2.3 Les matériaux multiferroïques**

Une nouvelle classe de matériaux, principalement des oxydes, va attirer toute notre attention : les multiferroïques. On nomme ainsi des matériaux qui peuvent avoir à la fois un ordre magnétique (le plus souvent antiferromagnétique) et un ordre ferroélectrique. Le couplage entre les deux ordres, s'il existe, est d'origine totalement inconnu aujourd'hui. Des mesures optiques, mais également de la spectroscopie RMN devraient pouvoir permettre de répondre aux questions suivantes : Comment le champ magnétique agit-il sur la structure afin de produire une polarisation électrique ? Est-ce que la polarisation vient des changements induits par les phonons dans la constante diélectrique ou est-ce plutôt un phénomène de relaxation des domaines ?

### **5.3.3 Systèmes électroniques confinés et fluctuations**

L'étude de systèmes électroniques en dimension réduite va prendre de l'ampleur au laboratoire. L'étude de films minces désordonnés et/ou granulaires va se poursuivre, en particulier grâce à des mesures thermo-électriques. Mais une nouvelle voie se dégage : grâce à la maîtrise de la synthèse de nanocristaux métalliques, des systèmes artificiels de basse dimension peuvent être réalisés. Des réseaux ordonnés de cristaux nanométriques de métaux nobles (Au) ou supraconducteurs (plomb, indium . . .) sont des systèmes modèles dont les paramètres spécifiques peuvent être variés dans une large gamme : taille des éléments de base, couplage, dimensionnalité . . . Des études locales et macroscopiques du transport électronique vont être réalisées. Enfin, la possibilité de structurer des matériaux à des échelles de quelques nanomètres (en collaboration avec le LPN Marcoussis) permettra d'étudier la physique de systèmes désordonnés à l'échelle locale.

Ces systèmes confinés sont le siège de fortes fluctuations, en particulier quantiques, dont il s'agit d'étudier l'importance pour comprendre par exemple l'origine de la tran-



sition isolant-métal ou isolant-supraconducteur, qui ont été largement étudiées dans des configurations "volumiques", où les effets de taille sont moyennés (projet soutenu à l'ESPCI).

### 5.3.3.1 Supraconducteurs en dimension réduite et Transition Supra-Isolant

La synthèse de nanocristaux de supraconducteurs comme le plomb et l'indium a été récemment maîtrisée au laboratoire. Les tailles vont de quelques nanomètres ( $1n$ ) à  $10 - 15nm$  pour le plomb. Ces nanocristaux sont entourés de ligands qui contrôlent leur arrangement quand on retire le solvant nécessaire à la synthèse. Ainsi, on peut créer des systèmes artificiels supraconducteurs dont la taille est de l'ordre de grandeur, voire inférieure à la longueur de cohérence supraconductrice, et dont le couplage (Josephson) peut être varié dans de grandes proportions (selon la nature et la longueur des ligands).

Les propriétés de confinement quantique seront étudiées au travers de mesures thermodynamiques (aimantation par exemple, ou coefficients thermoélectriques); les propriétés de transport électronique seront mesurées par conductivité DC à très basse température ( $250mK$ ) et sous champ magnétique essentiellement. L'accent sera mis sur l'étude de la transition isolant-supra et les propriétés de l'isolant de Bose d'une part, et sur l'étude des fluctuations supraconductrices d'autre part. Dans ce domaine, deux grandes questions guideront les recherches :

- Comment distinguer les fluctuations d'amplitudes et les fluctuations de phases ?
- Quelle est la réponse Nernst des supraconducteurs granulaires ?

De façon complémentaire, la transition isolant-supraconducteur sera également étudiée dans des systèmes présentant un ordre ou une instabilité ferro-électrique, comme SeTe ou PbTe par exemple. La compétition entre la localisation des charges et la tendance à former des paires de Cooper sera analysée, en particulier par des mesures spectroscopiques dans l'IR.

### 5.3.3.2 Conducteurs de basse dimension et transition Métal-Isolant

Deux approches seront poursuivies pour étudier les systèmes métalliques de basse dimension. D'une part, la réalisation de structures artificielles à base de nanocristaux métalliques. Des réseaux bidimensionnels seront synthétisés, et leurs propriétés de transport DC et optique seront étudiées, au voisinage de la transition métal-isolant. La spectroscopie tunnel locale donnera accès à la densité d'états électroniques.

D'autre part, un effort particulier sera fait sur la physique du Bismuth dans la limite ultra-quantique, c'est à dire en champ magnétique intense et à très basse température. Le confinement des électrons sur des orbites de Landau combiné avec l'anisotropie de la surface de Fermi du Bi lui confèrent en effet des propriétés remarquables, dont certaines s'apparentent à celles du liquide de Luttinger à 1D. Nous nous attacherons à répondre entre autre à ces questions génériques :

- Quels sont les coefficients du transport qui montrent des anomalies aux facteurs de remplissage fractionnel ? Que signifient ces valeurs ?

- Comment se comporte le transport électronique transverse ?
- Quel paramètre détermine l'amplitude du coefficient Nernst-Ettingshausen ?

### 5.3.3.3 Isolants d'Anderson

L'isolant d'Anderson est caractérisé par un très fort désordre qui tend à localiser les électrons. Microscopiquement, des états électroniques localisés cohabitent avec des fonctions d'ondes étendues, sur des distances caractéristiques de l'ordre du nanomètre. Nous souhaitons réaliser des nanostructures (inférieures à  $10nm$ ) dans des isolants d'Anderson. Il s'agit d'étudier les propriétés statistiques de ces matériaux où le désordre induit des propriétés particulières. Les mesures de prédilection seront le transport à basse température, l'étude du bruit ... nous étudierons ensuite les problèmes de cohérence de phase électronique dans ces systèmes, grâce au couplage avec des supraconducteurs dans des nano-jonctions Josephson. Cela pourra éventuellement déboucher sur une expérience originale de détection de paires EPR dans un système électronique.

### 5.3.4 Criticalité quantique et nouveaux ordres électroniques dans les fermions lourds

Les fermions lourds sont des matériaux fascinants. La plupart d'entre eux ont un diagramme de phase extrêmement riche entre différents ordres électroniques, qui ne sont pas toujours clairement identifiés. Certains d'entre eux présentent des transitions quantiques en fonction de paramètres de contrôle comme la pression ou le dopage. L'activité du laboratoire se poursuivra dans ce domaine (ANR ICENET), en se focalisant sur quelques systèmes clefs, et en utilisant principalement les sondes thermo-électriques. Les principales questions qui se posent aujourd'hui sont en autres :

- Que se passe-t-il aux coefficients de transports thermoélectriques au voisinage d'un point quantique critique ?
- Pourquoi nombre de points quantiques intéressants sont associés à une transition du premier ordre ( $CeCoIn_5$ ,  $URu_2SI_2$ ,  $PrFe_4P_{12}$ ) ? - Quel est le paramètre d'ordre d' $URu_2SI_2$  ? Et celui de  $PrFe_4P_{12}$  ?

### 5.3.5 Applications : électronique cryogénique et spintronique

Depuis quelques années, le LPEM a développé des dispositifs performants mettant en œuvre des Supraconducteurs à Haute Tc en appliquant une technique d'irradiation ionique (soutien post-doc MPPU-CNRS et thèse DGA). Cette activité va se poursuivre dans les deux directions suivantes :

*dispositifs mettant en œuvre des Jonctions Josephson*

Les projets engagés pour les années à venir sont plus particulièrement :

- étude et réalisations de détecteurs dans les domaine IR et THz avec pré-traitement RSFQ

- étude et réalisation de systèmes RSFQ simples : bascule T-flip-flop et décimateur en ligne pour un convertisseur analogique-digital rapide
- développements de SQUIDS avec la sociétés Starcryonélectronics
- développement d'un système de RMN bas-champ en vue d'applications bio-médicales
- développement de réseaux de jonctions pour les standards du Volt

*Développement d'une nouvelle thématique "spintronique"*

Il s'agit d'appliquer la technique d'irradiation ionique aux composés "manganites" qui sont des semi-métaux ferromagnétiques, et de réaliser des dispositifs en vue d'applications spintronique : jonctions magnétorésistives, manipulations de domaines et parois de domaine ...

## 5.4 Nanophysique, nanostructures et nanomatériaux

### 5.4.1 Introduction

Une des forces du laboratoire est sa capacité de développer une instrumentation originale et fine. Depuis une dizaine d'années, nous avons concentré nos efforts vers des axes de recherches novateurs en nanophotonique, nanomécanique et nanothermique. L'excellence du laboratoire dans les domaines comme la photothermique, la microscopie SNOM nous a permis de réaliser des percées significatives au niveau international.

*Le cadre et les défis*

Produire, contrôler mettre en œuvre la lumière sous toutes ses formes aux échelles nanométriques, tel est le défi pour les prochaines années. Le couplage des microscopies à pointe et des techniques de microfabrication a conduit au développement de la nanooptique. Dans ces systèmes, les plasmons jouent un rôle central. Ils peuvent être localisés autour de nanostructures (plasmons localisés), ou propagatifs sur une surface métallique et l'on parle alors de plasmons polaritons. Dans les deux cas, il se crée une onde évanescence dont l'étude peut se faire grâce aux outils de champ proche optique qui ont été développés au laboratoire.

Notre travail se trouvera au confluent d'études fondamentales comme la détection de la densité locale d'états de photons résultant du confinement spatial d'ondes de surface, et de développements plus appliqués comme la mise au point de sondes originales (nanocristaux capteurs de température et microscope à photoréflectance). Le LPEM se concentrera sur les deux axes principaux suivants : l'imagerie plasmonique et la nanothermique

### 5.4.2 Imagerie plasmonique

#### 5.4.2.1 Mesurer la densité électromagnétique locale

La réalisation récente du premier microscope à effet tunnel à rayonnement thermique a ouvert la voie à une nouvelle gamme d'études dans l'infrarouge basée sur l'étude du rayonnement thermique en champ proche avec une résolution nanométrique. D'autre

part, la limite de diffraction dans les spectromètres infrarouges à transformée de Fourier tels qu'ils existent actuellement empêche de sonder la matière sur des échelles submicroniques. Nous souhaitons lever cette barrière et proposons de développer un nouveau mode de spectroscopie infrarouge basé sur l'analyse spectrale du rayonnement thermique en champ proche, permettant d'atteindre une résolution spatiale d'une centaine de nanomètres dans une gamme de longueurs d'onde comprises entre 1 micromètre et quelques dizaines de micromètres (ANR NANOFTIR et thèse DGA). Cet objectif sera atteint en associant le TRSTM à un spectromètre à transformée de Fourier, afin d'analyser le spectre infrarouge du rayonnement thermique de champ proche localement révélé par la pointe du TRSTM. Cette approche ouvre la possibilité de sonder localement la dépendance en énergie des propriétés diélectriques des matériaux. Celles-ci sont influencées par la nature, la structure cristalline, le niveau de dopage, la présence d'ondes de surface. . . Le TRSTM couplé à un spectromètre à transformée de Fourier permettra aussi de mettre en évidence la quantification de la à l'instar du STM "électronique". Ce dispositif pourra enfin être appliqué à la caractérisation du champ évanescent produit par des lasers à semi-conducteurs, notamment les lasers à cascade quantique à guidage par air ou à plasmons de surface, fonctionnant dans l'infrarouge moyen ( $5\mu m < \lambda < 15\mu m$ ).

L'investigation de la EM-LDOS en champ proche par stimulation thermique ne peut se faire que pour sonder des modes situés dans l'infrarouge, faute de pouvoir chauffer suffisamment l'échantillon pour sonder les modes associés au domaine spectral du visible. En revanche, la densité d'états électromagnétique apparaît également dans l'expression du taux de désintégration radiatif, via la règle d'or de Fermi. L'imagerie du temps de vie de fluorescence d'un nano-objet fixé à l'extrémité d'une pointe devrait donc fournir une alternative aux mesures de champ proche thermique infrarouge, permettant d'accéder aux variations spatiales de la LDOS dans le domaine du visible (projet soutenu par MPPU-CNRS et CNano). On obtiendra ici aussi une sonde permettant de mesurer les variations spatiales de la EM-LDOS électromagnétique sur différentes structures confinées (corral, défaut ponctuels, . . .) dans le domaine spectral du visible, de manière analogue aux mesures qui peuvent être effectuées avec un STM pour sonder les variations locales de la densité d'états électronique.

#### 5.4.2.2 Imager les plasmons : fluorescence de nano objets

Le développement de nouvelles techniques d'imagerie optiques en champ proche utilisant des particules fluorescentes comme nanodétecteurs ou nanosources de lumière est une autre approche intéressante. Pour ce faire, il s'agira de diminuer la taille des sondes à un diamètre de  $50nm$  pour améliorer la résolution latérale, et d'utiliser de nouveaux matériaux actifs à base matériaux inorganiques comme des nanocristaux contenant des ions de terres rares, ou des boîtes quantiques semi-conductrices. L'emploi de nouveaux ions permettra d'accéder à d'autres longueurs d'onde d'émission et d'excitation. Il sera ainsi envisagé :

- d'étudier, avec les sondes précédentes, des nanostructures générant des ondes de surfaces. Par exemple, il s'agira d'étudier des systèmes à base de nanofils et de chaînes

de particules métalliques pour le guidage et de nano-ouvertures pour créer des dispositifs focalisants et des capteurs chimiques et biochimiques à plasmons de surface fonctionnant sous incidence normale. Il s'agira aussi de comprendre les mécanismes de génération des plasmons, et de créer des générateurs de plasmons efficaces convertissant une grande partie de la lumière en onde de surface.

- d'étudier l'influence de l'environnement local sur la fluorescence de nanoparticules fixées à l'extrémité de pointes d'AFM. Il s'agira par exemple d'étudier les modifications spectrales de nanoparticules à raies d'émission multiples (nanosources de lumière blanche) en fonction de la proximité de particules métalliques et diélectriques. Le but est de comprendre comment la présence d'un élément perturbateur influence la fluorescence d'une particule fluorescente, soit en "quenchant", soit en exaltant certaines raies de fluorescence.

#### **5.4.2.3 Nano-antennes, méta-matériaux et lentilles de Pendry**

Nous souhaitons utiliser les exaltation contrôlées sur des nano-antennes ou des systèmes aléatoires sur film semi-continu et faire une image de ces zones d'exaltation dans un milieu externe au moyen, par exemple, d'une lentille de Pendry, c'est-à-dire une lentille "parfaite" fabriquée avec des matériaux à indice négatif et fonctionnant dans le champ proche. C'est d'une certaine façon la suite de l'idée que nous avons proposée sur l'imagerie plasmonique utilisant les pics d'exaltation comme sondes locales de champ proche. Dans les premiers développements de ce projet, on utilisera des objets possédant des propriétés d'exaltation bien définies (objets fabriqués et déposés au Danemark) que l'on projette à l'aide d'une lentille de Pendry, dans un premier temps un simple film d'argent. En plus de permettre de fabriquer des objets exaltants résistants (notamment pour les applications chimiques et biologiques), le couplage entre l'objet exaltant et la lentille change radicalement la forme spectrale de l'exaltation (travaux de simulation en cours avec Alexander Kildishev et Anne-Sophie Grimault et études expérimentales en développement à Purdue et à L'ESPCI).

#### **5.4.2.4 Fabriquer des systèmes plasmoniques : bio-inspiration**

L'arrivée au Laboratoire de Sébastien Bidaut nous permettra de renforcer le thème plasmonique grâce à son savoir faire pour la réalisation de nanoobjets. Les cristaux de tailles nanométriques, métalliques ou semiconducteurs, possèdent des propriétés optiques remarquables dont les applications en photonique et en biophysique ne sont plus à démontrer. Son projet de recherche porte en effet sur l'autoassemblage programmé de ces nanoparticules sur une matrice d'ADN pour les faire interagir de manière non-radiative et exploiter les propriétés optiques originales du système couplé obtenu.

Dans le cadre d'un séjour post-doctoral au FOM Institute AMOLF à Amsterdam, il a développé des procédés d'assemblage de colloïdes métalliques reposants sur l'utilisation d'"échafaudages" biochimiques tels que des double-brins d'ADN. La flexibilité de synthèse des molécules d'ADN (distance base à base de  $0,34nm$ ), leur rigidité structu-

relle à l'échelle de quelques centaines de nanomètres, leurs dimensions caractéristiques proches des cristaux que l'on veut étudier (3nm de diamètre) et leur compatibilité aussi bien aux cristaux métalliques que semiconducteurs, en font des candidates idéales pour ces études. De plus l'hybridation spécifique de mono-brins d'ADN permet de programmer leur auto-assemblage dans des géométries 2D ou 3D complexes, parfaitement symétriques ou au contraire fortement asymétriques.

### **5.4.3 Nanothermique**

Au développement grandissant de nanoobjets et de nanostructures est associé un besoin de caractérisation de leurs propriétés thermiques qui s'éloignent le plus souvent de celles du massif. Peu d'instruments sont capables de faire de telles mesures locales. Nous proposons deux méthodes tout optique dont l'une est limitée par la diffraction tandis que l'autre qui utilise des nanoobjets fluorescents a la potentialité de faire des mesures à plus petites échelles.

#### **5.4.3.1 Microscope à photoréflectance : caractérisation thermique de couches minces et de nanoobjets**

Le microscope à photoréflectance dont nous avons la maîtrise depuis de nombreuses années s'avère un instrument adapté aux problèmes de caractérisation de couches minces. Nous chercherons à rehausser ses performances en diversifiant les longueurs d'onde de travail, en cherchant de nouvelles configurations expérimentales en parallèle avec un travail théorique de modélisation. En particulier nous cherchons à découpler la détermination de la diffusivité et de la conductivité thermiques de couches minces d'épaisseur nanométriques déposées sur un substrat. Ce travail qui s'effectue en collaboration avec C. Fréty (LPPMD UMR 7615) est le premier pas vers une modélisation physique réaliste des phénomènes de transport à petite échelle. Pour cela nous travaillerons à dépasser le concept phénoménologique de "résistance d'interface", par une prise en compte des effets physiques aux échelles où le libre parcours moyen est supérieur aux dimensions mises en jeu. Notre participation au GDR CNRS n°2503 Micro et Nanothermique nous permet de confronter nos approches expérimentales aux modélisations.

Ces avancées expérimentales et théoriques seront validées à la fois sur des matériaux nanocomposites constitués d'inclusions métalliques en matrice solide, destinés à des études à caractère fondamental (ANR PNano EThNA) et sur des structures innovantes développées pour la nanoélectronique (ANR DIATHERM).

#### **5.4.3.2 Utilisation de nanosondes fluorescentes**

Le développement et l'amélioration, de nouveaux capteurs de température, à l'aide de nanosondes fluorescentes à balayage permettra d'une part l'observation de l'échauffement par effet Joule de nanofils métalliques et d'autre part la caractérisation des nanoheaters pour étudier l'influence de la température sur le mouvement et le comportement de protéines (moteurs moléculaires).

## 5.5 Caractérisation des matériaux et des systèmes

### 5.5.1 Introduction

Au cours de son activité passée, le laboratoire a acquis une expertise dans un certain nombre de domaines comme la tomographie optique cohérente, les mesures optiques ultimes (projet Virgo), la photothermique ou bien encore la microscopie électronique en transmission. Des outils ont été développés qui servent aujourd'hui à caractériser finement certains matériaux et/ou dispositifs. Nous présentons ici le futur de cette activité, plus proche des applications industrielles et/ou de "Recherche et Développement".

### 5.5.2 Tomographie optique cohérente plein champ : OCT

Nous avons fait la preuve que l'approche que nous avons proposée pour l'OCT (Optical Coherence Tomography) était sans doute la meilleure au niveau de la résolution spatiale : des tranches d'épaisseur inférieure au  $\mu m$  sont obtenues jusqu'à  $1mm$  de profondeur dans les tissus animaux (mammifères, insectes etc.) ou humains avec un montage sans laser femtoseconde et avec une dynamique bien supérieure à la microscopie confocale. Cependant l'utilisation d'une camera implique une stabilité  $\ll 1\mu m$  pendant la prise d'images ce qui est difficile pour les examens *in vivo* : deux voies ont été suivies avec succès : l'utilisation de flash (un têtard entrain de nager a pu être "découpé" virtuellement) ou d'une camera rapide (examen des yeux de rongeurs et de chats).

Sur la base de ces résultats, une start-up Française LLT (Light for Live Technology) est en cours de négociation avec le CNRS (FIST) pour obtenir un accord de licence sur l'OCT. En liaison avec l'INSERM de Lille (Serge Mordon) pour mettre sur le marché un instrument d'OCT basé sur les brevet du laboratoire. Parallèlement nous avons eu des contacts fructueux avec nos collègues médecins (Institut Curie, Paris et Sloan and Kettering, New York). Nous ne pouvons sortir simplement des hôpitaux des tissus pour analyse anatomopathologiques aussi prévoyons-nous de réaliser des systèmes simples et performants que nous pourrions mettre entre les mains des medecins.

### 5.5.3 Imagerie thermique de Circuits Intégrés en fonctionnement

#### 5.5.3.1 Imagerie de thermoréfectance : application à l'échauffement de CI

Le microscope imageur à thermoréfectance est aujourd'hui un outil fonctionnel, dont les performances sont au meilleur niveau international. A court et moyen terme, pour renforcer la validation de la méthode, nos efforts porteront sur la caractérisation de circuits intégrés d'architecture aussi novatrice que possible. C'est ainsi que dans le cadre de l'ANR DIATHERM, il est prévu de valider les structures SOD (Silicon On Diamond) en imageant la diffusion latérale de la chaleur autour de résistances lithographiées sur ces substrats. Enfin un projet PREI financé par la DGA est en cours, pour l'étude de l'échauffement dans des transistors de puissance recouverts de dissipateurs en diamant.

A plus long terme, nous souhaitons pouvoir transférer ce savoir faire vers une entreprise d'instrumentation. Une demande de financement conjointe avec SOPRA est en cours de conception afin de développer un prototype.

La spectroscopie de thermoréfectance sera développée. En équipant le microscope imageur à thermoréfectance d'un système dispersif nous avons déjà obtenu des résultats prometteurs sur les spectres de  $dR/dT$  de nanosphères d'or en matrice de silice, qui semblent étayer les prévisions théoriques (B. Palpant, M. Rashidi, INSP).

### **5.5.3.2 Etude de lasers à cascade quantique**

Nous avons récemment montré la possibilité de visualiser les Lasers à Cascades Quantiques (QCL) en fonctionnement par des techniques de champ proche dans le domaine de l'IR. Nous souhaitons étendre cette technique aux QCL émettant dans la gamme du THz. Pour cela, nous désirons notamment augmenter notablement les zones d'études accessibles (quelques microns carré) qui sont souvent trop petites par rapport aux longueurs d'onde utilisées (de 5 à 500 micromètres). Les études en champ proche sont actuellement limitées en excursion à moins de 100 micromètres. Dans l'infrarouge, la taille des images ne permet pas d'avoir une vision de l'ensemble des modes de la cavité des lasers à cascade quantique, dont la longueur est typiquement de 1 millimètre. Aucune expérience de champ proche n'a actuellement été réalisée sur les lasers à cascade quantique qui émettent dans le domaine térahertz, mais la longueur d'onde est dans ce cas tellement grande que l'excursion des SNOM serait de toute façon insuffisante pour mettre en évidence la périodicité des franges d'interférences associées aux modes de ces lasers. C'est pourquoi nous avons prévu de développer dans les prochaines années un SNOM à pointe diffusante capable d'effectuer des balayages sur des distances de l'ordre du millimètre avec une résolution nanométrique fonctionnant à des fréquences infrarouge ou térahertz.

### **5.5.4 Le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo**

Notre rôle dans Virgo avait fortement diminué depuis la fin de la réalisation des composants optiques de la première génération. Aujourd'hui les besoins en nouveaux instruments de métrologie ne sont pas clairement définis et il n'est pas encore question d'utiliser un matériau différent de la silice pour les prochains miroirs. Nous avons décidé d'axer notre collaboration sur le développement de techniques originales de verrouillage de l'interféromètre. Nous allons débiter une collaboration avec le groupe Virgo du LAL et mettre en place sur le site d'Orsay un interféromètre de test suspendu sous vide de cinquante mètres. Le verrouillage sera réalisé avec un laser intermédiaire légèrement désaccordé (par rapport à la fréquence de résonance des cavités) qui "verra" des cavités de basse finesse. Le verrouillage sur ce laser permettra de figer (refroidir) les cavités, ce qui facilitera le verrouillage sur le laser principal.



### **5.5.5 Imagerie thermique haute résolution**

L'un des axes de recherche mis en place récemment consiste à développer des méthodes instrumentales pour caractériser du point de vue thermique les matériaux de construction. Les échantillons sont sollicités thermiquement de manière à privilégier soit un transport convectif, soit un transport diffusif de la chaleur et la réponse thermique est enregistrée avec une caméra infrarouge. L'analyse des données corrélée aux conditions d'échange thermique permet d'accéder aux propriétés telles la diffusivité thermique, l'effusivité ou le facteur de transfert de chaleur par convection. Le domaine applicatif de ces recherches vise les matériaux de construction. Ainsi, la société Colas nous a sollicités pour caractériser différents revêtements autoroutiers.

Dans le domaine des composants électroniques, il serait intéressant de développer une instrumentation plus automatisée incluant la caméra infrarouge et un système de chauffe pour répondre aux demandes de mesures thermiques sur des composants en fonctionnement avec prise en compte de l'émissivité. Or, le logiciel d'acquisition développé par CEDIP limite les possibilités de dialogue entre la caméra et l'extérieur. Il serait particulièrement intéressant de contourner ce problème, éventuellement avec l'aide de CEDIP, pour développer une interface plus ouverte.

### **5.5.6 La microscopie électronique en transmission TEM**

Depuis longtemps, le LPEM a développé une activité importante en microscopie électronique en transmission. Des études importantes ont été réalisées dans le domaine des matériaux (oxydes, polymères, couches minces métalliques . . .) et de la biologie, grâce notamment à l'acquisition d'un microscope à effet de champ performant, doté de puissantes capacités d'analyse X (JEOL 2010 FEG). Aujourd'hui, une bonne partie de l'activité concerne la caractérisation de nanocristaux et de couches minces. Des matériaux ferro-électriques, magnétiques, des électrides et des multiferroïques utilisés en particulier pour des recherches fondamentales au LPEM sont susceptibles d'être caractérisés grâce à cet équipement. Il est cependant assez clair que les moyens humains sont limités pour faire face à la demande.

Le LPEM est engagé dans une réflexion pour fonder un nouveau projet scientifique autour de cet instrument, qui s'appuiera fortement sur les collaborations locales à l'ESPCI, sur la Montagne Saint Geneviève (ENSCP) et plus généralement le réseau de microscopie de Paris.



# 6 Bibliographie

## 6.1 Articles dans des revues avec comité de lecture

- [1] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and C. MICHEL, *Classical and Quantum Gravity* **20**, S915 (2003), Sp. Iss. SI.
- [2] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and C. MICHEL, *Classical and Quantum Gravity* **20**, S609 (2003), Sp. Iss. SI.
- [3] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and S. PARDI, *Applied Optics* **46(17)**, 3466 (2007).
- [4] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and D. PASSUELLO, *Classical and Quantum Gravity* **23(19)**, S829 (2006), Sp. Iss. SI.
- [5] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and D. PASSUELLO, *Classical and Quantum Gravity* **23(19)**, S635 (2006), Sp. Iss. SI.
- [6] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and P. RAPAGNANI, *Classical and Quantum Gravity* **23(8)**, S197 (2006), Sp. Iss. SI.
- [7] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and P. RAPAGNANI, *Classical and Quantum Gravity* **23(8)**, S187 (2006), Sp. Iss. SI.
- [8] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and P. RAPAGNANI, *Classical and Quantum Gravity* **23(8)**, S63 (2006), Sp. Iss. SI.
- [9] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and A. REMILLIEUX, *Optics and Lasers in Engineering* **45(4)**, 478 (2007).
- [10] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and A. REMILLIEUX, *Classical and Quantum Gravity* **22(18)**, S1189 (2005), Sp. Iss. SI.
- [11] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and A. REMILLIEUX, *Classical and Quantum Gravity* **22**, S1041 (2005), Sp. Iss. SI.
- [12] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and I. RICCIARDI, *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement* **55(6)**, 1985 (2006).
- [13] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and I. RICCIARDI, *Classical and Quantum Gravity* **23(8)**, S91 (2006), Sp. Iss. SI.
- [14] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and I. RICCIARDI, *Classical and Quantum Gravity* **22(18)**, S1069 (2005), Sp. Iss. SI.
- [15] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and I. RICCIARDI, *Classical and Quantum Gravity* **22**, S869 (2005), Sp. Iss. SI.

- [16] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and I. RICCIARDI, *Classical and Quantum Gravity* **22**, S1139 (2005), Sp. Iss. SI.
- [17] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and I. RICCIARDI, *Classical and Quantum Gravity* **22**, S185 (2005), Sp. Iss. SI.
- [18] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and G. RUSSO, *Classical and Quantum Gravity* **23(8)**, S85 (2006), Sp. Iss. SI.
- [19] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and F. TRAVASSO, *Astroparticle Physics* **20(6)**, 617 (2004).
- [20] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and F. TRAVASSO, *Classical and Quantum Gravity* **21**, S395 (2004), Sp. Iss. SI.
- [21] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and F. TRAVASSO, *Classical and Quantum Gravity* **21**, S709 (2004), Sp. Iss. SI.
- [22] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and F. TRAVASSO, *Classical and Quantum Gravity* **21**, S385 (2004), Sp. Iss. SI.
- [23] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and F. TRAVASSO, *Classical and Quantum Gravity* **21**, S425 (2004), Sp. Iss. SI.
- [24] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and H. TRINQUET, *Classical and Quantum Gravity* **21**, S433 (2004), Sp. Iss. SI.
- [25] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and H. TRINQUET, *Astroparticle Physics* **21**, 1 (2004).
- [26] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and M. YVERT, *Astroparticle Physics* **21**, 465 (2004).
- [27] F. ACERNESE, A. C. BOCCARA, and F. LORIETTE, V. TRAVASSO, *Astroparticle Physics* **20**, 629 (2004).
- [28] L. AIGOUY, Y. DE WILDE, and M. MORTIER, *Applied Physics Letters* **83**, 147 (2003).
- [29] L. AIGOUY, Y. DE WILDE, M. MORTIER, J. GIERAK, and E. BOURHIS, *Applied Optics* **43**, 3829 (2004).
- [30] L. AIGOUY, P. LALANNE, J. P. HUGONIN, G. JULIE, V. MATHET, and M. MORTIER, *Physical Review Letters* **98**, 153902 (2007).
- [31] L. AIGOUY, V. MATHET, and P. BEAUVILLAIN, *Optics Communications* **262**, 263 (2006).
- [32] L. AIGOUY, M. MORTIER, J. GIERAK, and E. BOURHIS, *Physics and Chemistry of Glasses-European Journal of Glass Science and Technology Part B* **47**, 83 (2006).
- [33] L. AIGOUY, M. MORTIER, J. GIERAK, E. BOURHIS, Y. DE WILDE, P. CORSTJENS, and H. J. TANKE, *Journal of Applied Physics* **97**, 104322 (2005), Part 1.
- [34] L. AIGOUY, B. SAMSON, G. JULIE, V. MATHET, N. LEQUEUX, C. N. ALLEN, H. DIAF, and B. DUBERTRET, *Review of Scientific Instruments* **77(6)** (2006).

- [35] L. AIGOUY, G. TESSIER, M. MORTIER, and B. CHARLOT, *Applied Physics Letters* **87**, 184105 (2005).
- [36] C. ALLEN, N. LEQUEUX, C. CHASSENIEUX, G. TESSIER, and B. DUBERTRET, *A paraître dans Nature Advanced Materials* (2007).
- [37] N. ALLEN, N. LEQUEUX, C. CHASSENIEUX, G. TESSIER, and B. DUBERTRET, *Accepté dans Advanced Materials* (2007).
- [38] F. AMIOT, F. HILD, F. KANOUI, and J. P. ROGER, *Journal of Physics D-Applied Physics* **40**, 3314 (2007).
- [39] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *International Journal of Solids and Structures* **44**, 2863 (2007).
- [40] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Instrumentation – Mesure – Métrologie*, **5**, numéro spécial intitulé “caractérisations à l’échelle du micromètre” (2005).
- [41] F. AMIOT and J. P. ROGER, *Applied Optics* **45**, 7800 (2006).
- [42] M. APRILI, T. KONTOS, M. L. DELLA ROCCA, J. LESUEUR, W. GUICHARD, P. GANDIT, A. BAUER, and C. STRUNK, *Comptes Rendus Physique* **7**, 116 (2006).
- [43] M. APRILI, T. KONTOS, W. GUICHARD, J. LESUEUR, and P. GANDIT, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 606 (2004).
- [44] O. ARNACHE, P. MONOD, N. BONTEMPS, D. GIRATA, and P. PRIETO, *Physica B-Condensed Matter* **384**, 71 (2006).
- [45] M. ATLAN, B. C. FORGET, A. C. BOCCARA, T. VITALIS, A. RANCILLAC, A. K. DUNN, and M. GROSS, *Journal of Biomedical Optics* **12** (2007).
- [46] M. ATLAN, B. C. FORGET, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, and M. GROSS, *Optics Letters* **30**, 1360 (2005).
- [47] M. ATLAN and M. GROSS, *Optics Letters* **32**, 1456 (2007).
- [48] M. ATLAN and M. GROSS, *Journal of the Optical Society of America A* **24**, 2701 (2007).
- [49] M. ATLAN and M. GROSS, *Applied Physics Letters* **91**, 113510+ (2007).
- [50] M. ATLAN and M. GROSS, *Journal of the European Optical Society : Rapid publications* **1**, 06025 (2006).
- [51] M. ATLAN and M. GROSS, *Review of Scientific Instruments* **77**, 116103 (2006).
- [52] M. ATLAN, M. GROSS, and E. ABSIL, *Optics Letters* **32**, 1456 (2007).
- [53] M. ATLAN, M. GROSS, B. C. FORGET, T. VITALIS, A. RANCILLAC, and A. K. DUNN, *Optics Letters* **31**, 2762 (2006).
- [54] H. AUBIN, C. A. MARRACHE-KIKUCHI, A. POURRET, K. BEHNIA, L. BERGE, L. DU-MOULIN, and J. LESUEUR, *Physical Review B* **73**, 094521 (2006).
- [55] C. BAINIER, C. VANNIER, D. COURJON, J. C. RIVOAL, S. DUCOURTIEUX, Y. DE WILDE, L. AIGOUY, F. FORMANEK, L. BELLIARD, P. SIRY, and B. PERRIN, *Applied Optics* **42**, 691 (2003).

- [56] A. BAUER, J. BENTNER, M. APRILI, M. L. DELLA-ROCCA, M. REINWALD, W. WEGSCHEIDER, and C. STRUNK, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 217001 (2004).
- [57] G. BEAUNE, B. DUBERTRET, O. CLEMENT, and AL., *Angewandte Chemie-International Edition* **46(28)**, 5421 (2007).
- [58] F. BEAUVILLE, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and D. PASSUELLO, *Classical and Quantum Gravity* **21**, S935 (2004), Sp. Iss. SI.
- [59] K. BEHNIA, L. BALICAS, and Y. KOPELEVICH, *A paraitre dans Science* (2007).
- [60] K. BEHNIA, R. BEL, Y. KASAHARA, Y. NAKAJIMA, H. JIN, H. AUBIN, K. IZAWA, Y. MATSUDA, J. FLOUQUET, Y. HAGA, Y. ONUKI, and P. LEJAY, *Physical Review Letters* **94**, 156405 (2005).
- [61] K. BEHNIA, C. CAPAN, and R. BEL, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 326 (2004).
- [62] K. BEHNIA, D. JACCARD, and J. FLOUQUET, *Journal of Physics-Condensed Matter* **16**, 5187 (2004).
- [63] K. BEHNIA, M. A. MEASSON, and Y. KOPELEVICH, *Physical Review Letters* **98**, 076603 (2007).
- [64] K. BEHNIA, M. A. MÉASSON, and Y. KOPELEVICH, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 166602 (2007) **98(16)** (2007).
- [65] R. BEL, K. BEHNIA, and H. BERGER, *Physical Review Letters* **91**, 066602 (2003).
- [66] R. BEL, K. BEHNIA, Y. NAKAJIMA, K. IZAWA, Y. MATSUDA, H. SHISHIDO, R. SETTAL, and Y. ONUKI, *Physical Review Letters* **92**, 217002 (2004).
- [67] R. BEL, K. BEHNIA, C. PROUST, P. VAN DER LINDEN, D. MAUDE, and S. I. VEDENEEV, *Physical Review Letters* **92**, 177003 (2004).
- [68] R. BEL, K. BEHNIA, C. PROUST, P. VAN DER LINDEN, D. MAUDE, and S. I. VEDENEEV, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 703 (2004).
- [69] R. BEL, H. JIN, K. BEHNIA, J. FLOUQUET, and P. LEJAY, *Physical Review B* **70**, 220501 (2004).
- [70] N. BERGEAL, X. GRISON, J. LESUEUR, G. FAINI, M. APRILI, and J. P. CONTOUR, *Applied Physics Letters* **87** (2005).
- [71] N. BERGEAL, J. LESUEUR, M. APRILI, G. FAINI, J. P. CONTOUR, and B. LERIDON, *NATURE PHYSICS cond-mat/0601265* (2007).
- [72] N. BERGEAL, J. LESUEUR, G. FAINI, M. APRILI, and J. P. CONTOUR, *Applied Physics Letters* **89** (2006).
- [73] N. BERGEAL, J. LESUEUR, M. SIRENA, G. FAINI, M. APRILI, J. P. CONTOUR, and B. LERIDON, *A paraitre dans Journal of Applied Physics* (2007).
- [74] N. BERGEAL, M. SIRENA, J. LESUEUR, G. FAINI, M. APRILI, and J. P. CONTOUR, *Applied Physics Letters* **90** (2007).

- [75] A. C. BOCCARA, B. C. FORGET, F. RAMAZ, E. BOSSY, M. GROSS, P. SANTOS, F. JEAN, and M. ATLAN, *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 3285 (2006).
- [76] M. BOCCARA, W. SCHWARTZ, E. GUIOT, G. VIDAL, R. DE PAEPE, A. DUBOIS, and A. C. BOCCARA, *Plant Journal* **50(2)**, 338 (2007).
- [77] N. BONTEMPS, *Physica C* **162-165**, 27 (2007).
- [78] N. BONTEMPS, R. P. S. M. LOBO, A. F. SANTANDER-SYRO, and A. ZIMMERS, *Annals of Physics* **321**, 1547 (2006).
- [79] E. BOSSY, L. AKROUT, V. BOUSSON, C. LATREMOUILLE, J. LAREDO, M. TALMANT, and P. LAUGIER, *Journal of Bone and Mineral Research* **18**, S323 (2003), Suppl. 2.
- [80] E. BOSSY, K. DAOUDI, A. C. BOCCARA, M. TANTER, J. F. AUBRY, G. MONTALDO, and M. FINK, *Applied Physics Letters* **89** (2006).
- [81] E. BOSSY, A. R. FUNKE, K. DAOUDI, A. C. BOCCARA, M. TANTER, and M. FINK, *Applied Physics Letters* **90(17)** (2007).
- [82] E. BOSSY, G. MONTALDO, M. TANTER, B. C. FORGET, F. RAMAZ, M. FINK, and A. C. BOCCARA, *Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing 2006* (2006).
- [83] E. BOSSY, F. PADILLA, F. PEYRIN, and P. LAUGIER, *Physics in Medicine and Biology* **50**, 5545 (2005).
- [84] E. BOSSY, M. TALMANT, M. DEFONTAINE, F. PATAT, and P. LAUGIER, *Ieee Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control* **51**, 71 (2004).
- [85] E. BOSSY, M. TALMANT, and P. LAUGIER, *Journal of the Acoustical Society of America* **115**, 2314 (2004), Part 1.
- [86] E. BOSSY, M. TALMANT, F. PEYRIN, L. AKROUT, P. CLOETENS, and P. LAUGIER, *Journal of Bone and Mineral Research* **19**, 1548 (2004).
- [87] C. BOUE, F. CASSAGNE, and D. FOURNIER, *Infrared Physics & Technology* **51**, 13 (2007).
- [88] C. BOUE and D. FOURNIER, *Infrared Physics & Technology* **48**, 122 (2006).
- [89] C. BOUE and D. FOURNIER, *Journal De Physique Iv* **125**, 101 (2005).
- [90] B. BRIAT, F. RAMAZ, H. B. RJEILY, and J. A. HODGES, *Optical Materials* **27**, 691 (2005).
- [91] A. BRILLET, J. Y. VINET, V. LORIETTE, J. M. MACKOWSKI, L. PINARD, and A. REMILLIEUX, *Physical Review D* **67** (2003).
- [92] C. CABANEL, D. BROURI, and J. Y. LAVAL, *European Physical Journal-Applied Physics* **34**, 107 (2006).
- [93] C. CAPAN and K. BEHNI, *Physical Review Letters* **95**, 259703 (2005).
- [94] C. CAPAN, K. BEHNI, Z. Z. LI, H. RAFFY, and C. MARIN, *Physical Review B* **67**, 100507 (2003).

- [95] S. CAPRARA, M. GRILLI, B. LERIDON, and J. LESUEUR, *Phys. Rev. B* **72**, 104509 (2005).
- [96] O. CARION, B. MAHLER, T. PONS, and B. DUBERTRET, *Accepté dans Nature Protocols* (2007).
- [97] M. CAZAYOUS, A. SACUTO, G. HOROWITZ, P. LANG, A. ZIMMERS, and R. P. S. M. LOBO, *Physical Review B* **70**, 081309(R) (2004).
- [98] F. CHASLES, B. DUBERTRET, and A. C. BOCCARA, *Accepté dans Optics Letters* (2007).
- [99] F. CHASLES, B. DUBERTRET, and A. C. BOCCARA, *Optics Letters* **31**, 1274 (2006).
- [100] Y. DE WILDE, F. FORMANEK, and L. AIGOUY, *Review of Scientific Instruments* **74**, 3889 (2003).
- [101] Y. DE WILDE, F. FORMANEK, R. CARMINATI, B. GRALAK, P. A. LEMOINE, K. JOULAIN, J. P. MULET, Y. CHEN, and J. J. GREFFET, *Nature* **444**, 740 (2006).
- [102] G. DEUTSCHER, A. F. SANTANDER-SYRO, and N. BONTEMPS, *Physical Review B* **72** (2005).
- [103] S. DILHAIRE, D. FOURNIER, and G. TESSIER, *Microscale and Nanoscale Heat Transfer* **107**, 239 (2007).
- [104] C. DOUDARD, M. PONCELET, S. CALLOCH, C. BOUE, F. HILD, and A. GALTIER, *International Journal of Fatigue* **29**, 748 (2007).
- [105] B. DUBERTRET, *Nature Materials* **4**, 797 (2005).
- [106] B. DUBERTRET, *M S-Medecine Sciences* **20**, 737 (2004).
- [107] B. DUBERTRET, *M S-Medecine Sciences* **19**, 532 (2003).
- [108] A. DUBOIS and A. C. BOCCARA, *M S-Medecine Sciences* **22**, 859 (2006).
- [109] A. DUBOIS, K. GRIEVE, G. MONERON, R. LECAQUE, L. VABRE, and A. C. BOCCARA, *Applied Optics* **43**, 2874 (2004).
- [110] A. DUBOIS, G. MONERON, and A. C. BOCCARA, *Optics Communications* **266**, 738 (2006).
- [111] A. DUBOIS, G. MONERON, K. GRIEVE, and A. C. BOCCARA, *Physics in Medicine and Biology* **49**, 1227 (2004).
- [112] F. DUBOIS, B. MAHLER, B. DUBERTRET, E. DORIS, and C. MIOSKOWSKI, *Journal of the American Chemical Society* **129(3)**, 482 (2007).
- [113] S. DUCOURTIEUX, S. GRESILLON, J. C. RIVOAL, C. VANNIER, C. BAINIER, D. COURJON, and H. CORY, *European Physical Journal-Applied Physics* **26**, 35 (2004).
- [114] J. DUMONT, M. MORAGUES, B. LERIDON, J. LESUEUR, and J. P. CONTOUR, *European Physical Journal B* **35**, 331 (2003).
- [115] A. EL AZRAK, M. ZAZOUI, I. ZORKANI, M. HAMEDOUN, and N. BONTEMPS, *Journal of Physics-Condensed Matter* **18**, 8161 (2006).



- [116] C. FILLOY-CORBRION, G. TESSIER, S. HOLE, G. JEROSOLIMSKI, D. FOURNIER, and B. CHARLOT, *Journal De Physique Iv* **125**, 105 (2005).
- [117] C. FILLOY-CORBRION, G. TESSIER, S. HOLÉ, G. JEROSOLIMSKI, and D. FOURNIER, *Sensor Review* **23**, 35 (2003).
- [118] B. C. FORGET, M. ATLAN, L. P. J. SELB, F. RAMAZ, and A. C. BOCCARA, (2003).
- [119] B. C. FORGET, F. RAMAZ, M. ATLAN, J. SELB, and A. C. BOCCARA, *Applied Optics* **42**, 1379 (2003).
- [120] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, and L. AIGOUY, *Ultramicroscopy* **103**, 133 (2005).
- [121] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, and L. AIGOUY, *Journal of Applied Physics* **93**, 9548 (2003).
- [122] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, L. AIGOUY, and Y. CHEN, *Scanning* **26**, I63 (2004), Suppl. 1.
- [123] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, L. AIGOUY, W. K. KWOK, L. PAULIUS, and Y. CHEN, *Superlattices and Microstructures* **35**, 315 (2004).
- [124] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, G. S. LUENGO, and B. QUERLEUX, *Journal of Microscopy-Oxford* **224**, 197 (2006), Part 2.
- [125] D. FOURNIER, C. FILLOY, S. HOLE, J. P. ROGER, and G. TESSIER, *Journal De Physique Iv* **125**, 493 (2005).
- [126] A. FRAGOLA, L. AIGOUY, and A. C. BOCCARA, *Applied Optics* **42**, 6880 (2003).
- [127] A. FRAGOLA, L. AIGOUY, P. Y. MIGNOTTE, F. FORMANEK, and Y. DE WILDE, *Ultramicroscopy* **101**, 47 (2004).
- [128] L. R. DE FREITAS, A. M. MANSANARES, E. C. DA SILVA, M. C. B. PIMENTEL, S. FINCO, G. TESSIER, and D. FOURNIER, *Journal De Physique Iv* **125**, 121 (2005).
- [129] L. R. DE FREITAS, E. C. DA SILVA, A. M. MANSANARES, G. TESSIER, and D. FOURNIER, *Journal of Applied Physics* **98**, 63508 (2005).
- [130] R. GAUME, B. VIANA, D. VIVIEN, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *Applied Physics Letters* **83**, 1355 (2003).
- [131] R. GAUME, B. VIANA, D. VIVIEN, J. P. ROGER, D. FOURNIER, J. P. SOURON, G. WALLEZ, S. CHENAIS, F. BALEMBOIS, and P. GEORGES, *Optical Materials* **24**, 385 (2003).
- [132] F. GERVAIS, V. T. PHUOC, N. POIROT, C. COQUELET, C. GRUENER, and R. P. S. M. LOBO, *International Journal of Modern Physics B* **19**, 153 (2005), Part 1 Sp. Iss. SI.
- [133] M. GOLOSOVSKY, M. ABU-TEIR, D. DAVIDOV, O. ARNACHE, P. MONOD, N. BONTEMPS, and R. C. BUDHANI, *Journal of Applied Physics* **98** (2005).
- [134] M. GOLOSOVSKY, P. MONOD, and R. BUDHANI, *Accepté dans Phys. Rev. B* (2007).
- [135] L. H. GREENE, P. HENTGES, H. AUBIN, M. APRILI, E. BADICA, M. COVINGTON, M. M. PAFFORD, G. WESTWOOD, W. G. KLEMPERER, S. JIAN, and D. G. HINKS, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **387**, 162 (2003).

- [136] L. H. GREENE, P. J. HENTGES, H. AUBIN, M. APRILI, E. BADICA, M. COVINGTON, M. M. PAFFORD, G. WESTWOOD, W. G. KLEMPERER, S. JIAN, and D. G. HINKS, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 804 (2004).
- [137] S. GRESILLON, R. LECAQUE, L. WILLIAME, and J. C. RIVOAL, *Applied Physics B-Lasers and Optics* **84**, 167 (2006).
- [138] K. GRIEVE, G. MONERON, A. DUBOIS, J. F. LE GARGASSON, and A. C. BOCCARA, *Journal of Optics a-Pure and Applied Optics* **7**, 368 (2005).
- [139] K. GRIEVE, M. PAQUES, A. DUBOIS, J. SAHEL, A. C. BOCCARA, and J. F. LE GARGASSON, *Investigative Ophthalmology & Visual Science* **45**, 4126 (2004).
- [140] M. GROSS and M. ATLAN, *Optics Letters* **32**, 909 (2007).
- [141] M. GROSS, R. GOY, B. C. FORGET, M. ATLAN, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, and A. K. DUNN, *Optics Letters* **30**, 1357 (2005).
- [142] M. GROSS, F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Optics Express* **13**, 7097 (2005).
- [143] W. GUICHARD, M. APRILI, O. BOURGEOIS, T. KONTOS, J. LESUEUR, and P. GANDIT, *Physical Review Letters* **90** (2003).
- [144] P. J. HENTGES, G. WESTWOOD, H. AUBIN, W. G. KLEMPERER, and L. H. GREENE, *Ieee Transactions on Applied Superconductivity* **13**, 801 (2003), Part 1.
- [145] C. C. HOMES, R. P. S. M. LOBO, P. FOURNIER, A. ZIMMERS, and R. L. GREENE, *Physical Review B* **74**, 214515 (2006).
- [146] G. HOROWITZ, P. LANG, M. MOTTAGHI, and H. AUBIN, *Advanced Functional Materials* **14**, 1069 (2004).
- [147] T. IKARI, A. FUKUYAMA, T. MURATA, M. SUEMITSU, N. HADDAD, V. REITA, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *Materials Science and Engineering B* **124-125**, 345 (2005), Sp. Iss. SI.
- [148] K. IZAWA, K. BEHNIA, Y. MATSUDA, H. SHISHIDO, R. SETTAI, Y. ONUKI, and J. FLOUQUET, *cond-mat/0704.1970, à paraître dans Phys. Rev. Lett.* (2007).
- [149] K. IZAWA, Y. KASAHARA, Y. MATSUDA, K. BEHNIA, T. YASUDA, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *Physica B-Condensed Matter* **378-80**, 361 (2006).
- [150] K. IZAWA, Y. KASAHARA, Y. MATSUDA, K. BEHNIA, T. YASUDA, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *Physical Review Letters* **94**, 197002 (2005).
- [151] G. JEROSOLIMSKI, V. REITA, G. TESSIER, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *Journal De Physique Iv* **125**, 419 (2005).
- [152] Y. J. JO, L. BALICAS, C. CAPAN, K. BEHNIA, P. LEJAY, J. FLOUQUET, J. A. MYDOSH, and P. SCHLOTTMANN, *Physical Review Letters* **98**, 166404 (2007).
- [153] W. KALB, P. LANG, M. MOTTAGHI, H. AUBIN, G. HOROWITZ, and M. WUTTIG, *Synthetic Metals* **146**, 279 (2004).

- [154] T. KASAHARA, T. IWASAWA, H. SHISHIDO, T. SHIBAUCHI, K. BEHNIA, Y. HAGA, T. MATSUDA, Y. ONUKI, M. SIGRIST, and Y. MATSUDA, *cond-mat/0708.1042*, à paraître dans *Phys. Rev. Lett.* (2007).
- [155] Y. KASAHARA, Y. NAKAJIMA, K. IZAWA, Y. MATSUDA, K. BEHNIA, H. SHISHIDO, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *International Conference on Magnetism, Kyoto, Japon, août 2006, J. Magn. Magn. Mater* **310**, 569 (2007).
- [156] Y. KASAHARA, Y. NAKAJIMA, K. IZAWA, Y. MATSUDA, K. BEHNIA, H. SHISHIDO, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *Physical Review B* **72**, 214515 (2005).
- [157] S. J. KIM, X. GRISON, G. PASSERIEUX, J. AYACHE, J. LESUEUR, and F. LALU, *Journal of Crystal Growth* **249**, 186 (2003).
- [158] T. KONTOS, M. APRILI, J. LESUEUR, F. GENET, R. BOURSIER, and X. GRISON, *Physica B-Condensed Matter* **329**, 1265 (2003), Part 2.
- [159] T. KONTOS, M. APRILI, J. LESUEUR, X. GRISON, and L. DUMOULIN, *Physical Review Letters* **93** (2004).
- [160] A. LAIDEVANT, A. DA SILVA, M. BERGER, J. BOUTET, J. M. DINTEN, and A. C. BOCCARA, *Applied Optics* **46(11)**, 2131 (2007).
- [161] R. LECAQUE, S. GRESILLON, N. BARBEY, R. PERETTI, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Optics Communications* **262**, 125 (2006).
- [162] A. LEFEBVRE and P. BASSOUL, *Philosophical Magazine Letters* **84**, 495 (2004).
- [163] B. LERIDON, A. DÉFOSSEZ, J. DUMONT, J. LESUEUR, and J. P. CONTOUR, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 179704 (2003).
- [164] B. LERIDON, A. DEFOSSEZ, J. DUMONT, J. LESUEUR, and J. P. CONTOUR, *Physical Review Letters* **90** (2003).
- [165] B. LERIDON, J. LESUEUR, and M. APRILI, *Phys. Rev. B* **72**, 180505(R) (2005).
- [166] B. LERIDON, T.-K. NG, and C. M. VARMA, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 027002 (2007).
- [167] B. LERIDON, J. VANACKEN, T. WAMBECQ, and V. V. MOSHCHALOV, *Phys. Rev. B* **76**, 012503 (2007).
- [168] M. LESAFFRE, M. ATLAN, and M. GROSS, *Physical Review Letters* **97** (2006).
- [169] M. LESAFFRE, F. JEAN, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Optics Express* **15(3)**, 1030 (2007).
- [170] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. SIRENA, X. GRISON, G. FAINI, M. APRILI, J. P. CONTOUR, and W. GUICHARD, *IEEE Transactions on Superconductivity* **17**, 963 (2007).
- [171] P. C. LI, K. BEHNIA, and R. L. GREENE, *Physical Review B* **75**, 020506 (2007).
- [172] P. VAN DER LINDEN and K. BEHNIA, *Review of Scientific Instruments* **75**, 273 (2004).
- [173] R. P. S. M. LOBO, J. D. LAVEIGNE, D. H. REITZE, D. B. TANNER, Z. H. BARBER, E. JACQUES, P. BOSLAND, M. J. BURNS, and G. L. CARR, *Physical Review B* **72**, 024510 (2005).

- [174] V. LORINETTE and A. C. BOCCARA, *Applied Optics* **42**, 649 (2003).
- [175] L. MAHIEU-WILLIAME, S. GRESILLON, M. CUNIoT-PONSARD, and A. C. BOCCARA, *Journal of Applied Physics* **101(8)** (2007).
- [176] B. Z. MALKIN, S. K. SAIKIN, S. V. VERKHOVSKII, A. Y. YAKUBOVSKY, A. TROKINER, V. I. OZHOGIN, and M. CARDONA, *Phys. Rev. B.* **63**, 104201 (2003).
- [177] S. K. MANDAL, N. LEQUEUX, B. ROTENBERG, M. TRAMIER, J. FATTACCIOLI, J. BIBETTE, and B. DUBERTRET, *Langmuir* **21**, 4175 (2005).
- [178] S. MARCHAND, A. TROKINER, A. YAKUBOVSKII, A. KNIZHNIK, and Y. ECKSTEIN, *Physica C 408-410, 826-827 (2004)* **408-410**, 826 (2004).
- [179] S. MARCHAND, A. TROKINER, A. YAKUBOVSKY, A. KNIZHNIK, and Y. ECKSTEIN, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 826 (2004).
- [180] A. W. METZ, J. R. IRELAND, J. G. ZHENG, R. P. S. M. LOBO, Y. YANG, J. NI, C. L. STERN, V. P. DRAVID, N. BONTEMPS, C. R. KANNEWURF, K. R. POEPPELMEIER, and T. J. MARKS, *Journal of the American Chemical Society* **126**, 8477 (2004).
- [181] A. J. MILLIS, A. ZIMMERS, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, and C. C. HOMES, *Physical Review B* **72**, 224517 (2005).
- [182] G. MONERON, A. C. BOCCARA, and A. DUBOIS, *Optics Letters* **30**, 1351 (2005).
- [183] J. MOREAU, J. BANCOURT, and V. LORINETTE, *European Physical Journal-Applied Physics* **36**, 189 (2006).
- [184] J. MOREAU and V. LORINETTE, *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Brief Communications & Review Papers* **45**, 7141 (2006).
- [185] J. MOREAU and V. LORINETTE, *Optics Letters* **29**, 1488 (2004).
- [186] J. MOREAU, V. LORINETTE, and A. C. BOCCARA, *Applied Optics* **42**, 3800 (2003).
- [187] J. MOREAU, V. LORINETTE, and A. C. BOCCARA, *Applied Optics* **42**, 3811 (2003).
- [188] V. MOREAU, M. BAHRIZ, R. COLOMBELLI, P. A. LEMOINE, Y. DE WILDE, L. R. WILSON, and A. B. KRYSA, *Applied Physics Letters* **90**, 201114 (2007).
- [189] M. MULLER, P. MOILANEN, E. BOSSY, P. NICHOLSON, V. KILAPPA, T. TIMONEN, M. TALMANT, S. CHENG, and P. LAUGIER, *Ultrasound in Medicine and Biology* **31**, 633 (2005).
- [190] Y. NAKAJIMA, K. IZAWA, Y. MATSUDA, K. BEHNIA, H. KONTANI, M. HEDO, Y. UWATOKO, T. MATSUMOTO, H. SHISHIDO, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *Journal of the Physical Society of Japan* **75**, 023705 (2006).
- [191] Y. NAKAJIMA, H. SHISHIDO, H. NAKAI, T. SHIBAUCHI, K. BEHNIA, K. IZAWA, M. HEDO, Y. UWATOKO, T. MATSUMOTO, R. SETTAI, Y. ONUKI, H. KONTANI, and Y. MATSUDA, *Journal of the Physical Society of Japan* **76**, 024703 (2007).
- [192] S. NAKAMAE, K. BEHNIA, N. MANGKORNTONG, M. NOHARA, H. TAKAGI, S. J. C. YATES, and N. E. HUSSEY, *Physical Review B* **68**, 100502 (2003).

- [193] V. V. OGLOBLICHEV, A. V. POGUDIN, Y. V. PISKUNOV, S. V. VERKHOVSKII, A. Y. YAKUBOVSKY, and A. TROKINER, *Jetp Letters* **82**, 81 (2005).
- [194] T. ORLOVA, J. LAVAL, P. MONOD, and J. NOUDEM, *J. Phys. Condens. Matter*, 6729 (2006).
- [195] P. PADHAN, R. C. BUDHANI, and R. P. S. M. LOBO, *Europhysics Letters* **63**, 771 (2003).
- [196] F. PADILLA, E. BOSSY, G. HAIAT, F. JENSON, and P. LAUGIER, *Ultrasonics* **44**, E239 (2006).
- [197] F. PADILLA, E. BOSSY, and P. LAUGIER, *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Brief Communications & Review Papers* **45**, 6496 (2006).
- [198] N. K. PANDEY, R. P. S. M. LOBO, and R. C. BUDHANI, *Physical Review B* **67**, 054413 (2003).
- [199] S. PAOLONI and D. FOURNIER, *Review of Scientific Instruments* **74**, 523 (2003), Part 2.
- [200] A. PLECH, S. GRESILLON, G. VON PLESSEN, K. SCHEIDT, and G. NAYLOR, *Chemical Physics* **299**, 183 (2004), Sp. Iss. SI.
- [201] A. PLECH, V. KOTOLIDIS, S. GRESILLON, C. DAHMEN, and G. VON PLESSEN, *Physical Review B* **70** (2004).
- [202] A. PLECH, S. KURBITZ, K. J. BERG, H. GRAENER, G. BERG, S. GRESILLON, M. KAEMPFE, J. FELDMANN, M. WULFF, and G. VON PLESSEN, *Europhysics Letters* **61**, 762 (2003).
- [203] A. POGUDIN, Y. PISKUNOV, V. OGLOBLICHEV, S. VERKHOVSKII, A. YAKUBOVSKY, and A. TROKINER, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* **19**, 5 (2006).
- [204] A. V. POGUDIN, V. V. OGLOBLICHEV, Y. V. PISKUNOV, A. P. GERASHCHENKO, S. V. VERKHOVSKII, A. Y. YAKUBOVSKII, and A. TROKINER, *Jetp Letters* **80**, 114 (2004).
- [205] A. POURRET, H. AUBIN, J. LESUEUR, C. A. MARRACHE-KIKUCHI, L. BERGE, L. DU-MOULIN, and K. BEHNIA, *Nature Physics* **2**, 683 (2006).
- [206] A. POURRET, H. AUBIN, J. LESUEUR, C. MARRACHE-KIKUCHI, L. BERGÉ, L. DU-MOULIN, and K. BEHNIA, *cond-mat/0701376* (2007).
- [207] A. POURRET, K. BEHNIA, D. KIKUCHI, Y. AOKI, H. SUGAWARA, and H. SATO, *Physical Review Letters* **96**, 176402 (2006).
- [208] C. PROUST, K. BEHNIA, R. BEL, D. MAUDE, and S. I. VEDENEV, *Physical Review B* **72**, 214511 (2005).
- [209] F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Optics Express* **12**, 5469 (2004).
- [210] F. RAMAZ, L. RAKITINA, M. GOSPODINOV, and B. BRIAT, *Optical Materials* **27**, 1547 (2005).
- [211] K. RAUM, I. LEGUERNEY, F. CHANDELIER, E. BOSSY, M. TALMANT, A. SAIED, F. PEYRIN, and P. LAUGIER, *Ultrasound in Medicine and Biology* **31**, 1225 (2005).

- [212] C. RAVAT, E. ABSIL, S. HOLE, and J. LEWINER, *Journal of Applied Physics* **99** (2006).
- [213] J. A. REYES-ESQUEDA, L. VABRE, R. LECAGUE, F. RAMAZ, B. C. FORGET, A. DUBOIS, B. BRIAT, A. C. BOCCARA, G. ROGER, M. CANVA, Y. LEVY, F. CHAPUT, and J. P. BOILOT, *Optics Communications* **220**, 59 (2003).
- [214] F. SAKRAN, A. COPTY, M. GOLOSOVSKY, N. BONTEMPS, D. DAVIDOV, and A. FRENKEL, *Applied Physics Letters* **82**, 1479 (2003).
- [215] B. SAMSON, L. AIGOUY, R. LATEMPA, G. TESSIER, M. APRILI, M. MORTIER, J. LESUEUR, and D. FOURNIER, *Journal of Applied Physics* **102**, 024305 (2007).
- [216] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, and N. BONTEMPS, *New Challenges in Superconductivity : Experimental advances and emerging theories*, J. Ashkenazi et al eds, NATO Science Series **Springer**, 21 (2005).
- [217] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, Z. KONSTANTINOVIC, Z. Z. LI, and H. RAFFY, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 721 (2004).
- [218] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, Z. KONSTANTINOVIC, Z. Z. LI, and H. RAFFY, *Europhysics Letters* **62**, 568 (2003).
- [219] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, W. LOPERA, D. GIRATA, Z. KONSTANTINOVIC, Z. Z. LI, and H. RAFFY, *Physical Review B* **70**, 134514 (2004).
- [220] S. SAUVAGE, P. BOUCAUD, F. BRAS, G. FISHMAN, R. P. S. M. LOBO, F. GLOTIN, R. PRAZERES, J. M. ORTEGA, and J. M. GERARD, *Physica Status Solidi B-Basic Research* **238**, 254 (2003).
- [221] S. SAUVAGE, P. BOUCAUD, T. BRUNHES, F. BRAS, G. FISHMAN, F. GLOTIN, R. PRAZERES, J. M. ORTEGA, J. M. GERARD, M. BROQUIER, C. CREPIN, and R. P. S. M. LOBO, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* **507**, 569 (2003).
- [222] J. SELB, S. LÉVÊQUE-FORT, A. DUBOIS, B. C. FORGET, L. POTTIER, F. RAMAZ, and A. C. BOCCARA, *Biomedical Photonic Handbook*, CRC PRes (ISBN 0-8493-1116-0), 35.1 (2003).
- [223] I. SHEIKIN, H. JIN, R. BEL, K. BEHNIA, C. PROUST, J. FLOUQUET, Y. MATSUDA, D. AOKI, and Y. ONUKI, *Physical Review Letters* **96**, 077207 (2006).
- [224] M. SIRENA, N. BERGEAL, J. LESUEUR, G. FAINI, R. BERNARD, J. BRIATICO, D. CRETE, and J. P. CONTOUR, *Journal of Applied Physics* **101**, 123925 (2007).
- [225] M. SIRENA, S. MATZEN, N. BERGEAL, J. LESUEUR, G. FAINI, R. BERNARD, and J. BRIATICO, *Applied Physics Letters* (2007).
- [226] A. P. SVIRIDOV, V. CHERNOMORDIK, M. HASSAN, A. C. BOCCARA, A. RUSSO, P. SMITH, and A. GANDJBAKHICHE, *Journal of Biomedical Optics* **10** (2005).
- [227] M. TERAZIMA, N. HIROTA, S. E. BRASLAVSKY, A. MANDELIS, S. E. BIALKOWSKI, G. J. DIEBOLD, R. J. D. MILLER, D. FOURNIER, R. A. PALMER, and A. TAM, *Pure and Applied Chemistry* **76**, 1083 (2004).

- [228] G. TESSIER, *accepté dans Sensor Review* (2007).
- [229] G. TESSIER, M. BARDOUX, C. BOUE, and D. FOURNIER, *Applied Physics Letters* **90** (2007).
- [230] G. TESSIER, M. BARDOUX, C. BOUÉ, C. FILLOY, and D. FOURNIER, *Applied Physics Letters* **90**, 171112 (2007).
- [231] G. TESSIER, M. BARDOUX, C. FILLOY, C. BOUÉ, and D. FOURNIER, *accepté dans MRS Proceedings* (2007).
- [232] G. TESSIER, C. FILLOY, M. L. POLIGNANO, I. MICA, G. JEROSOLIMSKI, S. HOLE, and D. FOURNIER, *Journal De Physique Iv* **125**, 423 (2005).
- [233] G. TESSIER, S. HOLE, and D. FOURNIER, *Optics Letters* **28**, 875 (2003).
- [234] G. TESSIER, G. JEROSOLIMSKI, S. HOLE, D. FOURNIER, and C. FILLOY, *Review of Scientific Instruments* **74**, 495 (2003), Part 2.
- [235] G. TESSIER, J. JUMEL, D. ROCHAIS, F. ENGUEHARD, and D. FOURNIER, *Journal De Physique Iv* **125**, 109 (2005).
- [236] G. TESSIER, S. PAVAGEAU, C. FILLOY, B. CHARLOT, G. JEROSOLIMSKI, D. FOURNIER, S. CRETIN, S. DILHAIRE, S. GOMES, N. TRANNOY, P. VAIRAC, and S. VOLZ, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Thermic 05'), 27-30 septembre, Belgirate, Italie* (2005).
- [237] G. TESSIER, M. L. POLIGNANO, S. PAVAGEAU, C. FILLOY, D. FOURNIER, F. CERUTTI, and I. MICA, *Journal of Physics D-Applied Physics* **39**, 4159 (2006).
- [238] G. TESSIER, A. SALHI, Y. ROUILLARD, F. GENTY, J. P. ROGER, F. MONTEL, and D. FOURNIER, *Journal De Physique Iv* **125**, 375 (2005).
- [239] N. TESSIER-DOYEN, X. GRENIER, M. HUGER, D. SMITH, D. FOURNIER, and J. P. ROGER, *Journal of the European Ceramic Society* **27**, 2635 (2007).
- [240] A. TROKINER, A. BESSIERE, R. THOUVENOT, D. HAU, J. MARKO, W. NARDELLO, C. PIERLOT, and J. M. AUBRY, *Solid State Nuclear Magnetic Resonance* **25**, 209 (2004).
- [241] A. TROKINER, Y. PISKUNOV, A. GERASHENKO, A. POGUDIN, K. MIKHALEV, A. YAKUBOVSKY, and S. VERKHOVSKII, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 824 (2004).
- [242] A. TROKINER, S. VERKHOVSKII, A. YAKUBOVSKII, K. KUMAGAI, S. W. CHEONG, D. KHOMSKII, Y. FURUKAWA, J. S. AHN, A. POGUDIN, V. OGLOBLICHEV, A. GERASHENKO, K. MIKHALEV, and Y. PISKUNOV, *Physical Review B* **72** (2005).
- [243] A. TROKINER, A. YAKUBOVSKII, S. VERKHOVSKII, A. GERASHENKO, and D. KHOMSKII, *Physical Review B* **74** (2006).
- [244] P. J. E. M. VAN DER LIDEN and K. BEHNIA, *Rev. Scient. Instrum.* **75** (2004).
- [245] S. V. VERKHOVSKII, A. Y. YAKUBOVSKY, B. Z. MALKIN, S. K. SAIKIN, M. CARDONA, A. TROKINER, and V. I. OZHOGIN, *Physical Review B* **68** (2003).

- [246] A. YAKUBOVSKII, A. TROKINER, S. VERKHOVSKII, A. GERASHENKO, and D. KHOMSKII, *Physical Review B* **67** (2003).
- [247] M. YVERT, A. C. BOCCARA, V. LORIETTE, and E. TOURNEFIER, *Classical and Quantum Gravity* **21(5)**, S717 (2004), Sp. Iss. SI.
- [248] A. ZIMMERS, N. BONTEMPS, R. P. S. M. LOBO, and R. L. GREENE, *Physica C* **408-410**, 748 (2005).
- [249] A. ZIMMERS, N. BONTEMPS, R. P. S. M. LOBO, C. P. HILL, M. C. BARR, R. L. GREENE, C. C. HOMES, and A. J. MILLIS, *New Challenges in Superconductivity : Experimental advances and emerging theories*, J. Ashkenazi et al eds, *NATO Science Series Springer*, 27 (2005).
- [250] A. ZIMMERS, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, C. P. HILL, and R. L. GREENE, *Physica C-Superconductivity and Its Applications* **408-10**, 748 (2004).
- [251] A. ZIMMERS, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, C. C. HOMES, M. C. BARR, Y. DAGAN, and R. L. GREENE, *Physical Review B* **70**, 132502 (2004).
- [252] A. ZIMMERS, J. M. TOMCZAK, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, C. P. HILL, M. C. BARR, Y. DAGAN, R. L. GREENE, A. J. MILLIS, and C. C. HOMES, *Europhysics Letters* **70**, 225 (2005).

## 6.2 Articles dans des revues sans comité de lecture

- [253] L. AIGOUY, M. MORTIER, Y. DE WILDE, J. GIÉRAK, and E. BOURHIS, *Proceedings of SPIE* **54-58**, 163 (2004).
- [254] L. AIGOUY, B. SAMSON, M. MORTIER, G. JULIÉ, V. MATHET, and H. DIAF, *Proceedings of the SPIE* **5928**, 59280H1 (2005).
- [255] L. AIGOUY, G. TESSIER, M. MORTIER, and B. CHARLOT, *Proceedings of 11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05)* , 220 (2005).
- [256] H. AUBIN and K. BEHNIA, *Pour la Science* **315**, 82 (2004).
- [257] B. DUBERTRET, *Nature Materials* **4(11)** (2005).
- [258] B. DUBERTRET, *Médecine et Sciences* **20** (2004).
- [259] B. DUBERTRET, *Médecine et Sciences* **19** (2003).
- [260] A. FRAGOLA and L. AIGOUY, *Proceedings of SPIE-OSA Biomedical Optics* **5143**, 139 (2003).
- [261] R. LECAQUE, S. GRESILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Proceedings of ICONIC 2005* (2005).
- [262] G. MONERON, L. WILLIAME, A. DUBOIS, S. GRESILLON, , and A. C. BOCCARA, *Proceedings of SPIE* **5327**, 123 (2004).
- [263] N. RIVIER and B. DUBERTRET, *Pour la Science* **44** (2004).



- [264] L. WILLIAME, S. GRESILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Proceedings of ICONIC 2005* (2005).
- [265] L. WILLIAME, R. LECAQUE, E. LE MOAL, E. FORT, S. GRESILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Proceedings of SPIE* **5928** (2005).

### 6.3 Conférences invitées

- [266] L. AIGOUY, *International workshop on Nanoscale Energy Conversion and Information Processing Devices, Nice, France, 24-26 septembre* (2006).
- [267] C. ALLEN, N. LEQUEUX, CHASSENIEUX, G. TESSIER, and DUBERTRET, *Photonics North, 4-7 Juin, Ottawa, On, Canada* (2007).
- [268] M. ALTAN, K. GRIEVE, G. MONERON, A. DUBOIS, B. C. FORGET, F. RAMAZ, and A. C. BOCCARA, *Congrès général de la Société Française de Physique, 7-10 juillet, Lyon, France* (2003).
- [269] F. AMIOT, J. P. ROGER, and A. C. BOCCARA, *Optics East 2004 – 25-28 octobre 2004, Philadelphia, USA, Optomechatronic Sensors, Actuators, and Control, Proc. SPIE Vol. 5602, p. 133-139* (2004).
- [270] M. ATLAN, F. RAMAZ, M. GROSS, B. C. FORGET, and A. C. BOCCARA, *Optical Imaging Workshop 2004 : Fourth Inter-Institute Workshop on Optical Diagnostic Imaging from Bench to Bedside at the National Institutes of Health, 20-22 septembre, USA* (2004).
- [271] M. ATLAN, P. SANTOS, F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. GROSS, and A. C. BOCCARA, *Acousto-optic imaging, 4-8 juillet, Cargèse, France* (2005).
- [272] H. AUBIN, *A. I. LARKIN MEMORIAL CONFERENCE, 24-28 juin, Chernogolovka, Russia* (2007).
- [273] K. BEHNIA, *Canadian Institute For Advanced Research-Quantum Materials programme meeting, Mai, Vancouver, Canada* (2007).
- [274] K. BEHNIA, *Condensed Matter and Materials Physics Conference of Institute Of Physics, avril, Leicester, Angleterre* (2007).
- [275] K. BEHNIA, *International Workshop on Strongly Correlated Transition Metal Compounds, septembre, Cologne, Allemagne* (2006).
- [276] K. BEHNIA, *Workshop on Quantum Complexities in condensed Matter, juillet, Cambridge, Angleterre* (2006).
- [277] K. BEHNIA, *Workshop on correlated thermoelectrics, octobre, Hvar, Croatie* (2005).
- [278] K. BEHNIA, *Physical Phenomena at High Magnetic-V, août, Tallahassee, USA* (2005).
- [279] K. BEHNIA, *Workshop on Mottness and Quantum Criticality, juin, Tobago, Trinidad & Tobago* (2005).

- [280] K. BEHNIA, *APS March meeting, mars, Los Angeles, USA* (2005).
- [281] K. BEHNIA, *Gordon Research Conference on Correlated Electron Systems, South Hadley, juin, Massachusetts, USA* (2004).
- [282] K. BEHNIA, *Workshop on novel states and phase transitions in highly correlated matter, juillet, Trieste, Italie* (2004).
- [283] K. BEHNIA, *ICAM workshop on evolution of quantum effects from the Kondo to the Nanoscale, mai, Cargèse, France* (2004).
- [284] K. BEHNIA, *Third Regional conference on Magnetic and Superconducting Materials (MSM '03), septembre, Monastir, Tunisie* (2003).
- [285] K. BEHNIA, *Condensed Matter and Materials Physics Conference of Institute Of Physics Belfast, avril, Irlande du Nord* (2003).
- [286] A. C. BOCCARA, G. MONERON, and A. DUBOIS, *International meeting on micro and nanotechnologies (Minatec 2003), 22-26 septembre, Grenoble, France* (2003).
- [287] C. BOCCARA, *International Symposium "Topical Problems of Biophotonics - 2007" (2007)*.
- [288] C. BOCCARA, *29th IEEE EMBS Annual International Conference, 23-26 août, Lyon, France* (2007).
- [289] C. BOCCARA, *9e Conference Internationale de l'ACOMEN, 10-12 mai, Nice, France* (2007).
- [290] C. BOCCARA, *Photonic West 2005, Biomedical Optics - ouverture du congrès : Hot topics, San Jose, USA* (2005).
- [291] C. BOCCARA, *Conférences « Année mondiale de la Physique 2005 Ecole Polytechnique », 1er mars, Palaiseau, France* (2005).
- [292] C. BOCCARA, *Année mondiale de la Physique, Lille, France* (2005).
- [293] C. BOCCARA, *Atelier INSERM, Imagerie multidimensionnelle du vivant, 29 juin au 2 juillet, La Londe les Maures, France* (2005).
- [294] C. BOCCARA, *Atelier INSERM, Imagerie multidimensionnelle du vivant, 29 juin au 2 juillet, La Londe les Maures, France* (2005).
- [295] C. BOCCARA, *Colloque Paris-Biophotonique, 14 décembre, Paris, France* (2004).
- [296] C. BOCCARA, *Photonic Europe2004, 26-30 avril, SPIE Strasbourg, France* (2004).
- [297] C. BOCCARA, *Café des Sciences, Decembre, Optics Valley, Palaiseau, France* (2003).
- [298] C. BOCCARA, *Envie d'amphis, Paris, France* (2003).
- [299] N. BONTEMPS, *Kavli Institute for Theoretical Physics China (KITPC), Quantum Phases of Matter, 10-26 juillet, Beijing, Chine* (2007).
- [300] N. BONTEMPS, *Kavli Institute for Theoretical Physics China (KITPC), Quantum Phases of Matter, 10-26 juillet, Beijing, Chine* (2007).

- [301] N. BONTEMPS, *Kavli Institute for Theoretical Physics China (KITPC), Quantum Phases of Matter, 10-26 juillet, Beijing, Chine (2007).*
- [302] N. BONTEMPS, *Superconductivity and Magnetism in the Perovskites and other Novel Materials, Research Workshop of the Israel Science foundation & the Heinrich Hertz Minerva Center, 6-10 mai, Ramat Gan, Israël (2007).*
- [303] N. BONTEMPS, *Kavli Institute for Theoretical Physics China (KITPC), Quantum Phases of Matter, 10-26 juillet, Beijing, Chine (2007).*
- [304] N. BONTEMPS, *Frontiers in Condensed Matter, 20-22 avril, Rutgers University, USA (2007).*
- [305] N. BONTEMPS, *Mottness and Quantum Criticality, 8-19 juin, Tobago, West Indies (2005).*
- [306] N. BONTEMPS, A. ZIMMERS, J. TOMCZAK, and R. P. S. M. LOBO, *10th Franco-American Workshop on complex oxides : « Strongly Correlated Fermions, Functional Materials and their interplay », 2-3 juillet, Caen, France (2006).*
- [307] E. BOSSY, *16th International Bone Densitometry Workshop, 20-24 Juin, Annecy, France (2004).*
- [308] Y. DE WILDE, *Ecole de Physique Les Houches : Thermal radiation at the nanoscale : forces, heat transfer, coherence », 21-25 mai, Les Houches, France (2007).*
- [309] Y. DE WILDE, *NANOMETA 2007 - The 1st European Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials, 8-11 janvier, Seefeld, Autriche (2007).*
- [310] Y. DE WILDE, *E-MRS Spring Meeting, Symposium A : Sub-wavelength photonics throughout the spectrum : Materials and Techniques, 28 mai au 1 juin, Strasbourg, France (2007).*
- [311] Y. DE WILDE, *The 6th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics , 13-17 juin, Yellow Mountain, Chine (2007).*
- [312] Y. DE WILDE, *2007 International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics, 27-29 mars, NIST Gaithersburg, USA (2007).*
- [313] Y. DE WILDE, *Optique - Grenoble 2007 – COLOQ'10 de la SFO, 2-5 juillet, Grenoble, France (2007).*
- [314] Y. DE WILDE, *6th France-Japan Workshop on Nanomaterials, 5-9 mars, Sapporo, Japon (2006).*
- [315] Y. DE WILDE, *Workshop US-France Nanoscale Energy Conversion and Information Processing Devices, 23-26 septembre, Nice, France (2006).*
- [316] Y. DE WILDE, *Workshop on the Coupling of Synchrotron Radiation IR and X-rays with Tip based Scanning Probe Microscopies, X-tip, ESRF, 16-18 novembre, Grenoble, France (2005).*
- [317] Y. DE WILDE, *Advanced Scanning PRObes for Innovative Nanoscience and Technology, ASPRINT, 24-25 octobre, Dijon, France (2005).*

- [318] B. DUBERTRET, *NIS Colloquium : Nanosized Systems for Molecular Imaging*, 10-11 novembre, Torino, Italie (2006).
- [319] B. DUBERTRET, *Cancernanotech Conference*, 17-18 mai, Paris, France (2006).
- [320] B. DUBERTRET, *ICASSP 2006*, 15-19 mai, Toulouse, France (2006).
- [321] B. DUBERTRET, *79th ACS Meeting Colloid and Surface Science Symposium*, 12-15 Juin, Potsdam, New York, USA (2005).
- [322] B. DUBERTRET, *2005 APS March meeting*, 21-26 mars, Los Angeles, USA (2005).
- [323] B. DUBERTRET, *Nanobio Europe*, 22-24 septembre, Munster, Germany (2005).
- [324] B. DUBERTRET, *46th Symposium of the Society for Histochemistry*, 22-25 Septembre, Prague, Tchequie (2004).
- [325] B. DUBERTRET, *Retraite Neurophysique*, 10-11 Juin, Québec, Canada (2004).
- [326] B. DUBERTRET, *Symposium of the Society of Non Traditional Technology*, 01-04 Septembre, Tokyo, Japon (2004).
- [327] B. DUBERTRET, *4th Workshop on Nanochemistry and Nanobiotechnology*, 25-27 Août, Stockholm, Suède (2004).
- [328] B. DUBERTRET, *Applied Medical Photonics : From tissue characterization to optical mammography*, 22-25 Mai, Berlin, Allemagne (2004).
- [329] B. DUBERTRET, *International workshop on single molecule biophysics*, 4-5 Janvier, Bangalore, Inde (2004).
- [330] B. DUBERTRET, *OECI 25th annual meeting*, 20-22 Mai, Berlin, Allemagne (2004).
- [331] B. DUBERTRET, *International Symposium on Nanotechnology for Photonics and Opto-Electronics*, 5-6 Mars, Tokyo, Japon (2003).
- [332] B. DUBERTRET, *Rencontres Internationales MINATEC*, 25 Septembre, Grenoble, France (2003).
- [333] B. DUBERTRET, *Ernst Schering Research Foundation Workshop Molecular Imaging*, 5-7 Novembre, Berlin, Allemagne (2003).
- [334] B. DUBERTRET, *Nanobiotechnologies II*, 22-24 avril, Grenoble, France (2003).
- [335] B. . DUBERTRET, *Photonics and Optoelectronics Group seminar (séminaire de groupe)*, 26 Avril, Munich, Allemagne (2004).
- [336] A. DUBOIS and A. C. BOCCARA, *Colloque Imagerie vitale : des cellules au petit animal*, 7 février, Genocentre d'Evry, France (2005).
- [337] A. DUBOIS, G. MONERON, K. GRIEVE, and A. C. BOCCARA, *International conference on Biomedical Optics (ALT'03)*, 19-23 septembre, Silsoe, UK, Angleterre (2003).
- [338] A. DUBOIS, W. SCHWARTZ, K. GRIEVE, G. MONERON, and A. C. BOCCARA, *Colloque Imagerie optique non-conventionnelle*, 14-15 mar, ESPCI, Paris, France (2005).
- [339] A. DUBOIS, R. WANG, G. MONERON, K. GRIEVE, and A. C. BOCCARA, *SPIE's International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine (PIBM 2005)*, 3-6 septembre, Tianjin, Chine (2005).

- [340] B. DUBRETRET, *Second international meeting of the European Society for Molecular Imaging, 14-15 juin, Naples, Italie* (2007).
- [341] B. DUBRETRET, *SPIE Photonics West 2007, 20-25 janvier, San Jose, CA, USA* (2007).
- [342] C. FILLOY, D. FOURNIER, S. HOLÉ, S. PAVAGEAU, and G. TESSIER, *EOS Conference on Industrial Imaging and Machine Vision, 13- 15 juin, München, Allemagne* (2005).
- [343] D. FOURNIER, C. BOUÉ, V. REITA, J. P. ROGER, O. LAVIGNE, S. J. KIM, M. POULAIN, and R. MEVREL, *Thermal Barrier and environmental coatings, 17-22 août, Irsee, Allemagne* (2003).
- [344] D. FOURNIER, C. FILLOY, S. HOLÉ, J. P. ROGER, and G. TESSIER, *Congrès de l'ACP, 5-8 juin, Vancouver, Canada* (2005).
- [345] D. FOURNIER, C. FILLOY, S. HOLÉ, J. P. ROGER, and G. TESSIER, *Proceedings of the 13th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 5-8 juillet 2004, Rio de Janeiro, Brésil, J. de Phys. IV,125, p. 493-498* (2005).
- [346] D. FOURNIER, C. FILLOY, S. HOLÉ, J. P. ROGER, and G. TESSIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [347] D. FOURNIER and C. FRETIGNY, *14th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 6-9 janvier, Le Caire, Egypte* (2007).
- [348] D. FOURNIER, J. P. ROGER, and G. TESSIER, *Gordon conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 26 juin au 1 juillet, Trieste, Italie* (2005).
- [349] S. GRÉSILLON, *European summer school on new trends in Terahertz imaging NTTI2007, 9-13 juillet, Paris, FRANCE* (2007).
- [350] S. GRÉSILLON, *Seminar der Lehrstuhl für photonik und Optoelektronik, 25 juin, Munich, Allemagne* (2007).
- [351] S. GRÉSILLON, *Nanotechnology seminar series, 27 avril, Purdue, West Lafayette, IN, USA* (2005).
- [352] K. GRIEVE, M. ATLAN, G. MONERON, A. DUBOIS, B. C. FORGET, F. RAMAZ, and A. C. BOCCARA, *Colloque IMVIE (Imagerie pour les Sciences du Vivant et la Médecine), 15-18 septembre, Strasbourg, France* (2003).
- [353] K. GRIEVE, A. DUBOIS, A. C. BOCCARA, M. PAQUES, and J. F. LEGARGASSON, *Congrès de la Société Française des Lasers Médicaux (SFLM), 25-28 janvier, Les Arcs, France* (2004).
- [354] K. GRIEVE, A. DUBOIS, M. SIMONUTTI, M. PAQUES, J. SAHEL, J. F. LEGARGASSON, and A. C. BOCCARA, *SPIE's International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine (PIBM 2005), 3-6 septembre, Tianjin, Chine* (2005).
- [355] S. GRÉSILLON, L. WILLIAME, A. C. BOCCARA, S. DUCOURTIEUX, J. C. RIVOAL, P. GADENNE, N. A. KOTOV, and V. M. SHALAEV, *12th international Laser Physics Workshop LPHYS'03, 25-29 août, Hamburg, Allemagne* (2003).

- [356] S. GRÉSILLON, R. LECAQUE, L. WILLIAME, S. DUCOURTIEUX, A. C. BOCCARA, J. C. RIVOAL, P. GADENNE, H. CORY, and V. M. SHALAEV, *13th international Laser Physics Workshop LPHYS'04, 12-16 juillet, Trieste, Italie* (2004).
- [357] J. Y. LAVAL, *Journées scientifiques GDR ferroélectrique, septembre, Paris, France* (2004).
- [358] J. Y. LAVAL, C. CABANEL, and D. BROURI, *Colloque de la Société Française des Microscopies, juillet, Caen, France* (2005).
- [359] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *15th International laser Physics Workshop 2006, 24-28 juillet, Lausanne, Suisse* (2006).
- [360] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *GDR THz 2006, 9 mai, Paris, FRANCE* (2006).
- [361] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Congrès annuel du GDR ondes, 21-23 novembre, Besançon, France* (2005).
- [362] B. LERIDON, J. LESUEUR, and M. APRILI, *GDR Physique mésoscopique, octobre, La Grande Motte, France* (2006).
- [363] B. LERIDON, J. LESUEUR, and M. APRILI, *Journées STCS/CNRS Paris, France* (2004).
- [364] B. LERIDON, T. K. NG, and C. M. VARMA, *Journées dispositifs supraconducteurs, Ecole Polytechnique, Palaiseau* (2007).
- [365] B. LERIDON, J. VANACKEN, T. WAMBECQ, and V. V. MOSHCHALOV, *GDR neem, décembre, CEA-Saclay, France* (2006).
- [366] J. LESUEUR, *Congrès SFP Matière condensée, Nancy, France* (2004).
- [367] J. LESUEUR, M. APRILI, H. AUBIN, K. BEHNIA, B. LERIDON, N. BERGEAL, M. L. DELLA ROCA, and A. POURRET, *Workshop « matériaux à propriétés remarquables », Paris, France* (2005).
- [368] J. LESUEUR, M. APRILI, B. LERIDON, K. BEHNIA, and H. AUBIN, *Workshop « matériaux à propriétés remarquables », Caen, France* (2004).
- [369] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *International conference « Coherence and incoherence in strongly correlated systems », Rome, Italie* (2007).
- [370] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *STCS-CNRS workshop on superconductivity, Caen, France* (2006).
- [371] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *Workshop IOP superconductivity, Londres, Angleterre* (2006).
- [372] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *Gordon conference on superconductivity, California, USA* (2006).
- [373] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *Journées THz et supraconductivité, Rustrel, France* (2006).

- [374] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *Journées THz à l'Observatoire, Paris, France* (2005).
- [375] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *Gordon conference on superconductivity, Oxford, Angleterre* (2004).
- [376] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *Journées THz à l'Observatoire, Paris, France* (2004).
- [377] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, T. KONTOS, M. SIRENA, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *GDR NEEM, Saclay, France* (2006).
- [378] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. SIRENA, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *Conference SEE-Cryogénie, Aussois, France* (2006).
- [379] J. LESUEUR, M. SIRENA, N. BERGEAL, X. FABRÈGES, G. FAINI, R. BERNARD, J. BRIATICO, and D. CRÉTÉ, *SEE workshop, Palaiseau, France* (2007).
- [380] J. LESUEUR, M. SIRENA, N. BERGEAL, X. FABRÈGES, S. MATZEN, G. FAINI, R. BERNARD, J. BRIATICO, and D. CRÉTÉ, *GDR NEEM, Palaiseau, France* (2007).
- [381] J. LESUEUR, M. SIRENA, N. BERGEAL, G. FAINI, R. BERNARD, and R. BRIATICO, *EUCAS conference, 16-20 septembre, Bruxelles, Belgique* (2007).
- [382] R. P. S. M. LOBO, *Optical sum rules : their relevance to high-Tc superconductors and correlated systems, juillet, Rome, Italie* (2007).
- [383] R. P. S. M. LOBO, *New3SC, janvier, Sydney, Australie* (2007).
- [384] R. P. S. M. LOBO, *16th users meeting of the Brazilian Light Source – février, Campinas, SP, Brésil* (2006).
- [385] R. P. S. M. LOBO, *5th International Conference Stripes 06 – Quantum Phenomena in Complex Matter, décembre, Rome, Italie* (2006).
- [386] R. P. S. M. LOBO, *Atelier d'échanges Soleil et utilisateurs infrarouge, octobre, Saclay, France* (2006).
- [387] R. P. S. M. LOBO, *Short Pulses Work shop, Soleil Synchrotron, janvier, Orsay, France* (2006).
- [388] R. P. S. M. LOBO, *Low Energy Electrodynamics in Solids – LEES 06, juillet, Tallinn, Estonie* (2006).
- [389] R. P. S. M. LOBO, *SPIE Optics & Photonics 2005 – août, San Diego, CA, USA* (2005).
- [390] R. P. S. M. LOBO, *2004 University of Miami Workshop on Unconventional Superconductivity– janvier, Miami, FL, USA* (2004).
- [391] R. P. S. M. LOBO, *Les Journées de la Matière Condensée – JMC 9 – septembre, Nancy, France* (2004).
- [392] R. P. S. M. LOBO, *8th Symposium on High-Temperature Superconductors in High-Frequency Fields, mai, Begur, Espagne* (2004).
- [393] R. P. S. M. LOBO, *Strongly Correlated Fermions : Functional Materials and Their interplay – mai, Urbana, IL, USA* (2003).

- [394] G. MONERON, A. DUBOIS, and A. C. BOCCARA, *Japan-France conference on molecular photonics and biophotonics at micro and nano-scale (JFC2003)*, 26-29 octobre, Hyogo, Japan (2003).
- [395] G. MONERON, A. FRAGOLA, F. FORMANEK, L. WILLIAME, A. DUBOIS, L. AIGOUY, Y. DE WILDE, S. GRÉSILLON, and A. C. BOCCARA, *The International Nanophotonics Symposium Handai*, 24-26 juillet, Osaka, Japon (2003).
- [396] A. POURRET, H. AUBIN, J. LESUEUR, C. MARRACHE-KIKUCHI, L. BERGÉ, L. DU-MOULIN, and K. BEHNIA, *I2CAM conference*, Santa Fe, USA (2006).
- [397] F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Réunion du GDR IMCODE*, 9 décembre, ESPCI, Paris, France (2004).
- [398] F. RAMAZ, B. C. FORGET, E. BOSSY, M. GROSS, and A. C. BOCCARA, *10ème journée de la Matière Condensée*, 28 août au 1er septembre, Toulouse, France (2006).
- [399] F. RAMAZ, B. C. FORGET, A. DUBOIS, M. GROSS, E. BOSSY, and A. C. BOCCARA, *3rd EOS Topical Meeting on Advanced Imaging Techniques*, 12-14 septembre, Hotel Alliance Couvent des Minimes, Lille, France (2007).
- [400] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, and N. BONTEMPS, *HTSO4 NATO Workshop on Unconventional Superconductivity*, janvier, University of Miami, USA (2004).
- [401] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, and H. RAFFY, *7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors*, 25-30 mai, Rio de Janeiro, Brésil (2003).
- [402] G. TESSIER, *2007 MRS Spring Meeting, Symposium on "Nanoscale Heat Transport - From Fundamentals to Devices"*, 9-14 avril, San Francisco, USA (2007).
- [403] G. TESSIER, *Therminic 2006*, September 27-29, Nice, France (2006).
- [404] G. TESSIER, *International Workshop on Nanoscale Energy Conversion and Information Processing Devices*, 24-26 septembre, Nice, France (2006).
- [405] A. TROKINER, *EcoleThématique "matériaux à nouveaux états électroniques"*, 27 mai-2 juin, Aussois, France (2006).
- [406] A. TROKINER, *Ecole Thématique "matériaux à nouveaux états électroniques"*, 27 mai-2 juin, Aussois, France (2006).
- [407] A. TROKINER, *7th SCENET European School on Superconducting Materials and Applications*, 17-29 juillet, Camerino, Italie (2006).
- [408] A. TROKINER, *Réunion RMN Grand Bassin Parisien*, juin, Saclay, France (2005).
- [409] A. TROKINER, *Réunion annuelle du GDR NEEM*, mai, Batz, France (2005).
- [410] A. TROKINER, *5th SCENET European School on Superconducting Materials and Applications*, 30 août-10 septembre, Salamanca, Espagne (2004).
- [411] A. TROKINER, *Journées Scientifiques de l'ESPCI*, 9-10 Novembre, Paris, France (2004).



- [412] A. TROKINER, *Workshop on Strongly Correlated Fermions and Functional Oxides, 16-17 décembre, CNRS-UIUC, ESPCI, Paris, France (2004).*
- [413] A. TROKINER, S. MARCHAND, A. KNIZHNIK, and G. KLOTZSCHE, *International ICAM Workshop NMR/EPR of Correlated Electron Superconductor, 15-21 octobre (2005).*
- [414] L. WILLIAME, S. GRÉSILLON, E. FORT, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Optics and Photonics 2006, 13-17 août, San Diego, USA (2006).*
- [415] L. WILLIAME, S. GRÉSILLON, E. FORT, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Optics and Photonics 2005, 31 juillet au 4 août, San Diego, USA (2005).*
- [416] L. WILLIAME, S. GRÉSILLON, E. FORT, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Optics East 2005, 23-26 octobre, Boston, USA (2005).*

## 6.4 Communications avec actes

- [417] E. ABSIL, G. TESSIER, D. FOURNIER, M. ATLAN, and M. GROSS, *C2I 2007, Colloque interdisciplinaire en instrumentation, 17-19 Octobre, Nancy, France (2007).*
- [418] L. AIGOUY, M. MORTIER, Y. DE WILDE, J. GIÉRAK, and E. BOURHIS, *Photonics Europe, Strasbourg, France, 26-30 avril (2004).*
- [419] L. AIGOUY, M. MORTIER, J. GIÉRAK, and E. BOURHIS, *XIVth International Symposium on Non-Oxyde Glasses (ISNOG-14), Cape Canaveral, USA, 7-12 novembre (2004).*
- [420] L. AIGOUY, B. SAMSON, M. MORTIER, G. JULIÉ, V. MATHET, and H. DIAF, *Optics and Photonics, San Diego, USA, 31 juillet au 4 août (2005).*
- [421] L. AIGOUY, G. TESSIER, Y. DE WILDE, M. MORTIER, and B. CHARLOT, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05'), 27-30 septembre, Belgirate, Italie (2005).*
- [422] L. AIGOUY, G. TESSIER, M. MORTIER, and B. CHARLOT, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05'), Belgirate, Italie, 28-30 septembre (2005).*
- [423] F. AMIOT, F. HILD, F. KANOUI, and J. P. ROGER, *CFM'07, 18e congrès français de mécanique, 27-31 août, Grenoble, France (2007).*
- [424] F. AMIOT, F. HILD, F. KANOUI, and J. P. ROGER, *CFM'07, 18e congrès français de mécanique, 27-31 août, Grenoble, France (2007).*
- [425] F. AMIOT, F. HILD, F. KANOUI, and J. P. ROGER, *ICEM 13 – Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics, 1-6 juillet, Alexandroupolis, Grèce - Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, édité par E.E. Gdoutos, Springer, ISBN 978-1-4020-6238-4, paper n° 175 (2007).*
- [426] F. AMIOT, F. HILD, F. KANOUI, and J. P. ROGER, *Proceedings of International Workshop on Nanomechanical Sensors, 7-10 mai, Copenhagen, Danemark (2006).*

- [427] F. AMIOT, F. HILD, V. REITA, and J. P. ROGER, *Actes du troisième colloque francophone Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie*, Club SFO/Cmoi, 18-22 novembre 2002, Saint Aubin de Médoc, France **477-482** (2003).
- [428] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Actes du XVII Congrès Français de Mécanique*, article n° 764, 29 août- 2 septembre, Troyes, France (2005).
- [429] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Actes du XVII Congrès Français de Mécanique*, article n°765, 29 août- 2 septembre, Troyes, France (2005).
- [430] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Proceedings of the 2005 SEM Annual International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, 7-9 juin, Portland, Oregon, USA - Published by the Society for Experimental Mechanics, ISBN 0-912053-90-9, paper n° 235 (2005).
- [431] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Proceedings of EMMC8, 8 th European Mechanics of Materials Conference*, 13-15 septembre, Cachan, France - ISBN 2-910241-00-9 (2005).
- [432] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *ICEM 12 - 12th International Conference on Experimental Mechanics*, 29 août- 2 septembre, Bari, Italie - *Advances in Experimental Mechanics*, édité par C. Pappalettere, McGraw-Hill, ISBN 88 386 6273-8, paper 99 , 2004 (2004).
- [433] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Proceedings of the 2004 SEM X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, june 7-10, 2004, Costa Mesa (USA), published by the Society for Experimental Mechanics, ISBN 0-912053-87-9, paper n° 308 (2004) (2004).
- [434] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Colloque interdisciplinaire en instrumentation (C2I 2004)*, 29-30 janvier, ENS Cachan, France - Vol.1, Instrumentation, aspects fondamentaux, D. Placko, D. Balageas, F. Lepoutre Eds, éditions Lavoisier Hermes **299-306** (2004).
- [435] F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Colloque Photomécanique 2004 sur l'Etude du Comportement des Matériaux et des Structures*, 4-6 mai, Albi, France, 2004, édité par l'Ecole des Mines d'Albi **49-56** (2004).
- [436] F. AMIOT, J. P. ROGER, and A. C. BOCCARA, *Optics East 2004*, 25-28 octobre 2004, Philadelphia, USA, *Optomechatronic Sensors Actuators and Control*, Proc. SPIE **5602**, 133 (2004).
- [437] F. AMIOT, J. P. ROGER, and A. C. BOCCARA, *BiOS 2003, International Conference on Biomedical Optics*, 25-31 janvier 2003, San Jose, USA - *Advanced Biomedical and Clinical Diagnostic Systems*, Proc. SPIE **4958**, 183 (2003).
- [438] M. ATLAN, B. C. FORGET, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, and M. GROSS, *Photonic West meeting, San José USA - Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing 2005*, eds. A.A Oraevsky and L.V. Wang, *Progress in biomedical optics and imaging*, ISSN 1605-7422/05, BIOS 2005, Proc SPIE **5697**, 209 (2005).

- [439] M. ATLAN, B. C. FORGET, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, and M. GROSS, *Proceedings of SPIE – Volume 5697 Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing 2005 : The Sixth Conference on Biomedical Thermoacoustics, Optoacoustics, and Acousto-optics*, Alexander A. Oraevsky, Lihong V. Wang, Editors, April 2005, pp. 209-216 , 209 (2005).
- [440] M. ATLAN, F. RAMAZ, B. C. FORGET, and A. C. BOCCARA, *World Conference on Ultrasound, 7-10 septembre, Paris, France* **565-568** (2003).
- [441] M. ATLAN, F. RAMAZ, B. C. FORGET, and A. C. BOCCARA, *Novel Optical Instrumentation for Biomedical Applications*, A.C. Boccara, Editor, *Proceedings of SPIE – OSA Biomedical Optics*, SPIE **5143**, 22 (2003).
- [442] M. ATLAN, F. RAMAZ, B. C. FORGET, and A. C. BOCCARA, *Proceedings of SPIE – Volume 5143 Novel Optical Instrumentation for Biomedical Applications*, Albert-Claude Boccara, Editor, October 2003, pp. 22-28 , 22 (2003).
- [443] K. BEHNIA, R. BEL, A. POURRET, K. IZAWA, J. FLOUQUET, Y. NAKAJIMA, Y. MATSUDA, D. KIKUCHI, Y. AOKI, H. SUGAWARA, and H. SATO, *International Conference on Magnetism, août 2006, Kyoto, Japon - J. Magn. Magn. Mater* **310**, 446 (2007).
- [444] K. BEHNIA, C. CAPAN, and R. BEL, *Materials and Mechanism of Superconductivity-High Temperature Superconductivity VII, mai 2003, Rio de Janiero, Brésil - Physica C* **408-40**, 326 (2004).
- [445] R. BEL, K. BEHNIA, C. PROUST, P. VAN DER LIDEN, D. MAUDE, and S. I. VEDE-NEEV, *Materials and Mechanism of Superconductivity-High Temperature Superconductivity VII, mai 2003, Rio de Janiero, Brésil - Physica C* **408-410**, 703 (2004).
- [446] A. C. BOCCARA, B. C. FORGET, F. RAMAZ, E. BOSSY, M. GROSS, P. SANTOS, F. JEAN, and M. ATLAN, **119**, 3285 (2006).
- [447] N. BONTEMPS, *Physica C* **162-165**, 27 (2007).
- [448] E. BOSSY, A. R. FUNKE, K. DAOUDI, M. TANTER, M. FINK, and A. C. BOCCARA, *Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing II*, A. A. Oraevsky and L. V. Wang, eds. *Proc. SPIE* 6437 (2007).
- [449] E. BOSSY, G. MONTALDO, M. TANTER, B. C. FORGET, F. RAMAZ, M. FINK, and A. C. BOCCARA, *Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing II*, A. A. Oraevsky and L. V. Wang, eds. *Proc. SPIE* 6086, 6086X (2006).
- [450] E. BOSSY, L. SUI, T. W. MURRAY, and R. A. ROY, *Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing II*, A. A. Oraevsky and L. V. Wang, eds. *Proc. SPIE* 5697, 145-153 (2005).
- [451] E. BOSSY, M. TALMANT, L. AKROUT, P. LAUGIER, F. PEYRIN, and P. CLOETENS, *Proceedings of the IEEE 2004 Ultrasonics Symposium, Volume 1*, 576-579 (2004).
- [452] B. CHARLOT, K. TORKI, G. TESSIER, C. FILLOY, and D. FOURNIER, *Therminic'04, 29 septembre, Nice, France* (2004).

- [453] P. DELAYE, F. RAMAZ, M. GROSS, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, and G. ROOSEN, *10th Topical meeting on Photorefractive Materials, Effects and Devices, 19-23 Juillet, Sanya, Hainan, P. R. Chine - OSA Trends in Optics and Photonics, Photorefractive Materials, Effects and Devices* **99**, 687 (2005).
- [454] P. DELAYE, G. ROOSEN, F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, and M. GROSS, *Conference on Laser and Electro-Optics /Europe (CLEO), 12-17 Juin, Munich, Allemagne - Proceedings in : Laser and Electro-optics (CL3-6-FRI)* , 631 (2005).
- [455] C. FILLOY, G. TESSIER, S. HOLÉ, G. JÉROSOLIMSKI, D. FOURNIER, and B. CHARLOT, *J. Phys. IV* **125**, 105-107 (2005).
- [456] C. FILLOY, G. TESSIER, S. HOLÉ, G. JÉROSOLIMSKI, and D. FOURNIER, *3ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, 29-30 Janvier, Cachan, France* (2004).
- [457] B. C. FORGET, M. ATLAN, J. SELB, L. POTTIER, F. RAMAZ, and A. C. BOCCARA, *Proceedings of SPIE – Volume 4960 Biomedical Optoacoustics IV, Alexander A. Oraevsky, Editor, June 2003, pp. 147-155* (2003).
- [458] D. FOURNIER, C. FILLOY, S. HOLÉ, J. P. ROGER, and G. TESSIER, *J. Phys. IV* **125**, 493-498 (2005).
- [459] A. FRAGOLA and L. AIGOUY, *European Conference on Biomedical Optics (ECBO'03), 22-25 Juin, Munich, Allemagne* (2003).
- [460] A. FRAGOLA, L. AIGOUY, Y. DE WILDE, and M. MORTIER, *Proceedings de la conference NFO-7 - J. of Microsc.* **210**, 198 (2003).
- [461] L. R. DE FREITAS, A. M. MANSANARES, E. C. DA SILVA, M. C. B. PIMENTEL, S. FINCO, G. TESSIER, and D. FOURNIER, *J. Phys. IV* **125**, 121-124 (2005).
- [462] N. GARRAUD, F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *ICEM 13 – Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics, 1-6 juillet, Alexandroupolis, Grèce - Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, édité par E.E. Gdoutos, Springer, ISBN 978-1-4020-6238-4, paper n° 233* (2007).
- [463] N. GARRAUD, F. AMIOT, F. HILD, and J. P. ROGER, *Photomechanics 2006 - International conference on full-field measurement techniques and their applications in experimental solid mechanics, 10-12 juillet, Clermont Ferrand, France* (2006).
- [464] N. GARRAUD, F. AMIOT, J. P. ROGER, G. TESSIER, F. KANOUI, and F. HILD, *CFM'07, 18e congrès français de mécanique, 27-31 août, Grenoble, France* (2007).
- [465] S. GRAUBY, A. SALHI, L. D. PATINO LOPEZ, S. DILHAIRE, B. CHARLOT, W. CLAEYS, B. CRETIN, S. GOMES, G. TESSIER, N. TRANNOY, P. VAIRAC, and S. VOLZ, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05'), 27-30 septembre, Belgirate, Italie* (2005).
- [466] M. GROSS, M. LESAFFRE, F. JEAN, F. RAMAZ, P. DELAYE, G. ROOSEN, and A. C. BOCCARA, *5th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF 06), 6-8 décembre, Nara, Japon* (2006).

- [467] T. IKARI, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *Proceedings of the 12th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 24-27 June 2002, Toronto, Ontario, Canada - Rev. Sci. Instrum.* **74**, 553 (2003).
- [468] K. IZAWA, Y. KASAHARA, Y. MATSUDA, K. BEHNIA, T. YASUDA, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *Strongly correlated electron systems, SCES 2005, juillet 2005, Vienne, Autriche - Physica B* **378-380**, 361 (2006).
- [469] K. IZAWA, Y. NAKAJIMA, Y. KASAHARA, R. BEL, K. BEHNIA, H. SHISHIDO, R. SETTAI, Y. ONUKI, H. KONTANI, and Y. MATSUDA, *Materials and Mechanism of Superconductivity-High Temperature Superconductivity VIII, juillet 2006, Dresden, Allemagne - Physica C (sous presse)* (2007).
- [470] G. JEROSOLIMSKI, V. REITA, G. TESSIER, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *Proceedings of the 13th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 5-8 juillet 2004, Rio de Janeiro, Brésil - J. de Phys. IV* **125**, 419 (2005).
- [471] G. JEROSOLIMSKI, V. REITA, G. TESSIER, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *J. Phys. IV* **125**, 419-421 (2005).
- [472] J. JUMEL, F. LÉPOUTRE, J. P. ROGER, G. NEUER, M. CATALDI, and F. ENGUEHART, *Proceedings of the 12th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 24-27 juin 2002, Toronto, Ontario, Canada - Rev. Sci. Instrum.* **74**, 537 (2003).
- [473] J. JUMEL, F. LÉPOUTRE, N. TERRIEN, O. ARNOULT, and J. P. ROGER, *Proceedings of the 12th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 24-27 June 2002, Toronto, Ontario, Canada - Rev. Sci. Instrum.* **74**, 837 (2003).
- [474] Y. KASAHARA, Y. NAKAJIMA, K. YZAWA, Y. MATSUDA, K. BEHNIA, H. SHISHIDO, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *International Conference on Magnetism, août 2006, Kyoto, Japon - J. Magn. Magn. Mater* **310**, 569 (2007).
- [475] M. LESAFFRE, F. JEAN, A. BORDES, F. RAMAZ, E. BOSSY, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing II, A. A. Oraevsky and L. V. Wang, eds. Proc. SPIE 6086, 608612*, 286 (2006).
- [476] M. LESAFFRE, F. JEAN, A. FUNKE, P. SANTOS, M. ATLAN, B. C. FORGET, E. BOSSY, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *6th IFAC Symposium, "Modelling and Control in biomedical systems 2006", 20-22 Septembre, Reims, France - Proceedings, Edited by David Dagan Feng, Olivier Dubios, Janan Zaytoon, Ewart Carson, (ISBN -13 : 978-0-08-044530-4, ISBN -10 : 0-08-044530-6) Elsevier IFAC Publication*, 11 (2006).
- [477] J. LESUEUR, N. BERGEAL, X. GRISON, G. FAINI, M. APRILI, and J. P. CONTOUR, *ASC Conference, Seattle, USA* (2006).
- [478] R. P. S. M. LOBO, M. ELSÉN, P. MONOD, J. J. TU, E. M. CHOI, H. J. KIM, W. N. KANG, S. I. LEE, R. J. CAVA, and G. L. CARR, *New Challenges in Superconductivity : Experimental Advances and Emerging Theories, 2004 University of Miami*

- Workshop on Unconventional Superconductivity, Miami, FL, 11-16 Jan. 2004.* , 243 (2005).
- [479] S. MARCHAND, A. TROKINER, YAKUBOVSKII, A. KNIZHNIK, and Y. ECKSTEIN, *Physica C 408-410*, 826-827 (2004).
- [480] Y. NAKAJIMA, H. SHISHIDO, K. IZAWA, Y. MATSUDA, H. KONTANI, K. BEHNIA, H. HEDO, Y. UWATOKO, T. MATSUMOTO, R. SETTAI, and Y. ONUKI, *Materials and Mechanism of Superconductivity-High Temperature Superconductivity VIII, juillet 2006, Dresden, Allemagne - Physica C (sous presse)* (2007).
- [481] Y. NAKAJIMA, H. SHISHIDO, H. NAKAI, T. SHIBAUCHI, K. IZAWA, K. BEHNIA, H. HEDO, Y. UWATOKO, T. MATSUMOTO, R. SETTAI, Y. ONUKI, H. KONTANI, and Y. MATSUDA, *International Conference on Magnetism, août 2006, Kyoto, Japon - J. Magn. Magn. Mater* **310**, 334 (2007).
- [482] S. PAVAGEAU, G. TESSIER, C. FILLOY, G. JEROSOLIMSKI, D. FOURNIER, M. L. POLIGNANO, I. MICA, S. CASSETTE, R. AUBRY, and O. DURAND, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05')*, 27-30 septembre, Belgirate, Italie (2005).
- [483] F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing* , 154 (2005).
- [484] F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *colloque Techniques Optiques pour l'industrie, novembre, Saint-Etienne, France* , 407 (2004).
- [485] F. RAMAZ, M. LESAFFRE, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Controlling Light with Light (PR) Symposium, 14-16 octobre, Squaw Valley, Lake Tahoe, California, USA* (2007).
- [486] F. RAMAZ, J. A. REYES-ESQUEDA, G. ROGER, M. CANVA, Y. LEVY, L. VABRE, R. LECAQUE, B. C. FORGET, A. DUBOIS, B. BRIAT, A. C. BOCCARA, F. CHAPUT, J. P. BOILOT, L. MAGER, and A. FORT, *Photonics West Meeting, 25-31 janvier, San José, USA* (2003).
- [487] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, and N. BONTEMPS, *New Challenges in Superconductivity : Experimental Advances and Emerging Theories, 2004 University of Miami Workshop on Unconventional Superconductivity, Miami, FL, 11-16 Jan. 2004* , 21 (2005).
- [488] A. F. SANTANDER-SYRO, R. P. S. M. LOBO, N. BONTEMPS, Z. KONSTANTINOVIC, Z. Z. LI, and H. RAFFY, *Physica C* **408-410**, 721 (2004).
- [489] P. SANTOS, M. ATLAN, B. C. FORGET, E. BOSSY, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, and M. GROSS, *Proceedings of SPIE – Volume 6086 Photons Plus Ultrasound : Imaging and Sensing 2006 : The Seventh Conference on Biomedical Thermoacoustics, Optoacoustics, and Acousto-optics, Alexander A. Oraevsky, Lihong V. Wang, Editors, 608613 (Mar. 6, 2006)* , 608613 (2006).

- [490] P. SANTOS, M. ATLAN, B. C. FORGET, F. RAMAZ, A. C. BOCCARA, and M. GROSS, in *Novel Optical Instrumentation for Biomedical Applications II*, ed. C. Depeursinge, ECBO 2005, Proc SPIE 5864, Munich Allemagne (2005).
- [491] G. TESSIER, C. FILLOY, M. L. POLIGNANO, I. MICA, G. JEROSOLIMSKI, S. HOLÉ, and D. FOURNIER, *J. Phys. IV* 125, 423-425 (2005) (2005).
- [492] G. TESSIER, J. JUMEL, D. ROCHAIS, F. ENGUEHARD, and D. FOURNIER, *J. Phys. IV* 125, 109-111 (2005).
- [493] G. TESSIER, S. PAVAGEAU, B. CHARLOT, C. FILLOY, D. FOURNIER, B. CRETIN, S. DILHAIRE, S. GOMES, N. TRANNOY, P. VAIRAC, and S. VOLZ, *A paraître dans IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* (2007).
- [494] G. TESSIER, S. PAVAGEAU, C. FILLOY, B. CHARLOT, G. JEROSOLIMSKI, D. FOURNIER, S. CRETIN, S. DILHAIRE, S. GOMES, N. TRANNOY, P. VAIRAC, and S. VOLZ, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05')*, 27-30 septembre, Belgirate, Italie (2005).
- [495] G. TESSIER, A. SALHI, Y. ROUILLARD, F. GENTY, M. ROGER, J. P., F., and D. FOURNIER, *13th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil, Journal De Physique IV* **125**, 375 (2005).
- [496] N. TRANNOY, F. NEPVEU, S. GOMES, P. CHAPUIS, S. VOLZ, B. CHARLOT, B. CRETIN, S. DILHAIRE, G. TESSIER, and P. VAIRAC, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05')*, 27-30 septembre, Belgirate, Italie (2005).
- [497] A. TROKINER, Y. PISKUNOV, A. GERASHENKO, A. POGUDIN, K. MIKHALEV, A. YAKUBOVSKY, and S. VERKHOVSKII, *PhysicaC* 408-410 (2004).
- [498] P. VAIRAC, B. CRETIN, B. CHARLOT, S. DILHAIRE, S. GOMES, G. TESSIER, N. TRANNOY, and S. VOLZ, *11th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (Therminic 05')*, 27-30 septembre, Belgirate, Italie (2005).
- [499] H. ZHANG, H. TASHIRO, R. P. S. M. LOBO, D. H. REITZE, C. J. STANTON, D. B. TANNER, and G. L. CARR, *Low Temperature Physics : 24th International Conference on Low Temperature Physics LT24, Orlando, FL, 10-17 Aug. 2005, AIP Conf. Proc.* **850**, 981 (2006).
- [500] A. ZIMMERS, N. BONTEMPS, R. P. S. M. LOBO, and R. L. GREENE, *Physica C* **408-410**, 748 (2004).
- [501] A. ZIMMERS, N. BONTEMPS, R. P. S. M. LOBO, C. P. HILL, M. C. BARR, R. L. GREENE, C. C. HOMES, and A. J. MILLIS, *2004 University of Miami Workshop on Unconventional Superconductivity, Miami, FL, 11-16 Janvier, New Challenges in Superconductivity : Experimental Advances and Emerging Theories*, 27 (2005).

## 6.5 Communications sans actes

- [502] E. ABSIL, *Doctoriales de l'UPMC et du CEA, Juillet 2007, Gif sur Yvette, France* (2007).
- [503] E. ABSIL, M. GROSS, G. TESSIER, and M. COPPEY-MOISAN, *J3N2007, Journées du Réseau National nanosciences et Nanotechnologies, 25-27 Novembre, Paris, France* (2007).
- [504] E. ABSIL, M. GROSS, G. TESSIER, and M. COPPEY-MOISAN, *J3N2006, Journées du Réseau National nanosciences et Nanotechnologies, 6-8 Novembre, Be-sançon, France* (2006).
- [505] E. ABSIL, G. TESSIER, and M. GROSS, *Rencontres du Club SFO Photonique et Sciences du Vivant, 30 novembre, ESPCI, Paris, France* (2006).
- [506] L. AIGOUY, Y. DE WILDE, and M. MORTIER, *Forum 2003 des Microscopies à Sondes Locales, 25-28 mars, La Grande-Motte, France* (2003).
- [507] L. AIGOUY, G. JULIÉ, V. MATHET, and M. MORTIER, *9th International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics& Related Techniques, 10-15 septembre, Lausanne, Suisse* (2006).
- [508] L. AIGOUY, G. LALANNE, P. JULIÉ, V. MATHET, and M. MORTIER, *10ème Journées de la Matière Condensée, 28 août au 2 septembre, Toulouse, France* (2006).
- [509] L. AIGOUY and M. MORTIER, *Journées "Imagerie Optique non Conventionnelle" du GDR ISIS, 15-16 mars, Paris, France* (2005).
- [510] L. AIGOUY, M. MORTIER, Y. DE WILDE, J. GIÉRAK, and E. BOURHIS, *9ème Journées de la Matière Condensée (JMC9), 30 août au 3 septembre, Nancy, France* (2004).
- [511] F. AMIOT, J. P. ROGER, A. C. BOCCARA, and F. HILD, *BIOS 2004, International Conference on Biomedical Optics, 24-29 janvier, San Jose, USA* (2004).
- [512] M. ATLAN, P. SANTOS, B. C. FORGET, F. RAMAZ, E. BOSSY, and A. C. BOCCARA, *Journées Imageries optiques non-conventionnelles, 14-15 mars, ESPCI, Paris, France* (2005).
- [513] H. AUBIN, C. A. MARRACHE-KIKUCHI, A. POURRET, K. BEHNIA, L. BERGE, L. DUMOULIN, and J. LESUEUR, *APS March Meeting 2004, Mars, Los Angeles, USA* (2005).
- [514] H. AUBIN, A. POURRET, C. A. MARRACHE-KIKUCHI, K. BEHNIA, L. BERGE, L. DUMOULIN, and J. LESUEUR, *APS March Meeting 2004, Mars, Los Angeles, USA* (2006).
- [515] R. M. BAKKER, A. BOLTASSEVA, Z. LIU, S. GRESILLON, R. H. PEDERSEN, A. V. KILDISHEV, V. P. DRACHEV, and V. M. SHALAEV, *Frontiers in Optics 2007 / Laser Science XXIII conferences, 16-20 septembre, San José, Californie, USA* (2007).
- [516] M. BARDOUX, A. BOUSSEKSOU, G. TESSIER, S. BOUCHOULE, and D. FOURNIER, *OPTIMESS, 28 au 30 mars, Louvain, Belgique* (2007).



- [517] N. BERGEAL, J. LESUEUR, M. SIRENA, G. FAINI, M. APRILI, J. P. CONTOUR, and B. LERIDON, *à paraître dans J. Appl. Phys.* (2007).
- [518] P. BERGONZO and J. P. ROGER, *J3N2006, Journées du Réseau National nanosciences et Nanotechnologies, 6-8 Novembre, Be-sançon, France* (2006).
- [519] A. C. BOCCARA, F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. GROSS, and E. BOSSY, *2006 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging : From Nano to Macro, 6-9 avril, Arlington Virginia, USA* (2006).
- [520] E. BOSSY, A. COHEN, and R. O. CLEVELAND, *147th Meeting of the Acoustical Society of America, 24-28 Mai, New York, NY, USA* (2004).
- [521] E. BOSSY, F. PADILLA, F. JENSON, G. HAIAT, and P. LAUGIER, *148th Meeting of the Acoustical Society of America, 15-19 Novembre, San Diego, NY, USA* (2004).
- [522] E. BOSSY, L. SUI, T. MURRAY, and A. R. ROY, *147th Meeting of the Acoustical Society of America, 24-28 Mai, New York, NY, USA* (2004).
- [523] E. BOSSY, L. SUI, T. W. MURRAY, and A. R. ROY, *148th Meeting of the Acoustical Society of America, 15-19 November, San Diego, NY, USA* (2004).
- [524] E. BOSSY, M. TALMANT, P. LAUGIER, C. ROUX, S. KOLTA, and D. HAGUENAUER, *148th Meeting of the Acoustical Society of America, 15-19 Novembre, San Diego, NY, USA* (2004).
- [525] E. BOSSY, M. TALMANT, P. LAUGIER, C. ROUX, S. KOLTA, and D. HAGUENAUER, *148th Meeting of the Acoustical Society of America, 15-19 Novembre, San Diego, NY, USA* (2004).
- [526] S. CASSETTE, R. AUBRY, J. C. JACQUET, O. DURAND, J. WEAVER, P. DOBSON, D. FOURNIER, G. TESSIER, G. MILLS, M. L. POLIGNANO, I. MICA, A. HAMMICHE, J. PELZL, D. DIETZEL, R. MECKENSTOCK, S. CHOTIKAPRAKHAN, and N. FOTSING, *QMTIA'05, 9-10 juin, ESPCI, Paris, France* (2005).
- [527] S. CASSETTE, R. AUBRY, J. C. JACQUET, O. DURAND, J. WEAVER, P. STOPFORD, D. FOURNIER, G. TESSIER, C. FILLOY, G. JEROSOLIMSKI, S. HOLÉ, G. MILLS, M. L. POLIGNANO, I. MICA, H. POLLOCK, A. HAMMICHE, J. PELZL, D. DIETZEL, R. MECKENSTOCK, B. K. BEIN, S. CHOTIKARAKHAN, and N. FOTSING, *Microscale heat transfer, Eurotherm 75, 8-10 Juillet, Reims, France* (2003).
- [528] L. DAVID, S. GOMES, J. P. ROGER, G. CARLOT, D. FOURNIER, C. VALOT, and M. RAYNAUD, *14th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 6-9 janvier, Le Caire, Egypte* (2007).
- [529] Y. DE WILDE, *Ecole de Physique Les Houches : Thermal radiation at the nanoscale : forces, heat transfer, coherence », 21-25 mai, Les Houches, France* (2007).
- [530] Y. DE WILDE, *NANOMETA 2007 - The 1st European Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials, 8-11 janvier, Seefeld, Autriche* (2007).
- [531] Y. DE WILDE, *E-MRS Spring Meeting, Symposium A : Sub-wavelength photonics throughout the spectrum : Materials and Techniques, 28 mai-1 juin, Strasbourg, France* (2007).

- [532] Y. DE WILDE, *The 6th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics* », 13-17 juin, Yellow Mountain, Chine (2007).
- [533] Y. DE WILDE, *2007 International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics*, 27-29 mars, NIST Gaithersburg, USA (2007).
- [534] Y. DE WILDE, *Optique - Grenoble 2007 – COLOG'10 de la SFO*, 2-5 juillet, Grenoble, France (2007).
- [535] Y. DE WILDE, *6th France-Japan Workshop on Nanomaterials*, 5-9 mars, Sapporo, Japon (2006).
- [536] Y. DE WILDE, *GDR Thermique des Nanosystèmes et Nanomatériaux*, 13 juin, Ecole Centrale Paris, France (2006).
- [537] Y. DE WILDE, *GDR Ondes - Structures photoniques et plasmoniques pour la détection de molécules*, 19-20 Décembre, Institut Fresnel, Marseille, France (2006).
- [538] Y. DE WILDE, *Workshop US-France Nanoscale Energy Conversion and Information Processing Devices*, 23 – 26 septembre, Nice, France (2006).
- [539] Y. DE WILDE, *Workshop on the Coupling of Synchrotron Radiation IR and X-rays with Tip based Scanning Probe Microscopies, X-tip*, ESRF, 16-18 novembre, Grenoble, France (2005).
- [540] Y. DE WILDE, *Advanced Scanning Probes for Innovative Nanoscience and Technology*, ASPRINT, 24-25 octobre, Dijon, France (2005).
- [541] Y. DE WILDE, *Congrès général de la société française de physique*, 7-11 juillet, Lyon, France (2003).
- [542] Y. DE WILDE, F. FORMANEK, and L. AIGOUY, *The 8th international conference on near-field nano optics and related techniques (NFO-8)*, 5-9 septembre, Seoul, Corée (2004).
- [543] Y. DE WILDE, F. FORMANEK, and L. AIGOUY, *FORUM 2003 de Microscopies a Sondes Locales*, 25-28 mars, La Grande-Motte, France (2003).
- [544] Y. DE WILDE, F. FORMANEK, R. CARMINATI, B. GRALAK, K. JOULAIN, J. P. MULET, Y. CHEN, P. A. LEMOINE, and J. J. GREFFET, *NFO9 - 9th International conference on near-field optics, nanophotonics and related techniques*, 10-15 septembre, Lausanne, Suisse (2006).
- [545] Y. DE WILDE, F. FORMANEK, J. J. GREFFET, R. CARMINATI, K. JOULAIN, J. P. MULET, L. AIGOUY, and Y. CHEN, *GDR Ondes Groupe Thématique 5*, 15-16 décembre, Dijon, France (2004).
- [546] S. DEPUTIER, A. ROUSSEAU, H. GEHAN, J. R. DUBLERE, L. BUREL, A. PERRIN, M. GUILLOUX-VIRY, D. BROURI, and J. Y. LAVAL, *6ème journées couches minces ferroélectriques*, septembre, Nantes, France (2005).
- [547] C. FILLOY, D. FOURNIER, S. HOLÉ, G. JÉROSOLIMSKI, S. PAVAGEAU, G. TESSIER, S. CASSETTE, R. AUBRY, O. DURAND, M. L. POLIGNANO, and I. MICA, *QMTIA'05*, 9-10 juin 2005, ESPCI, Paris, France (2005).

- [548] C. FILLOY, G. JEROSOLIMSKI, G. TESSIER, S. HOLÉ, and D. FOURNIER, *Microscale heat transfer, Eurotherm 75, 8-10 Juillet, Reims, France* (2003).
- [549] C. FILLOY, G. TESSIER, S. HOLÉ, G. JEROSOLIMSKI, D. FOURNIER, and B. CHARLOT, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [550] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, and L. AIGOUY, *Journée Nanotechnologie 2003, Ministère Délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies, 16 Janvier, Paris, France* (2003).
- [551] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, L. AIGOUY, and Y. CHEN, *4th Asia-Pacific International Conference on Near-field Optics 2003, Grand Formosa Taroko, 13-16 août, Taroko, Hua-Lien, Taiwan* (2003).
- [552] F. FORMANEK, Y. DE WILDE, L. AIGOUY, W. KWOK, L. PAULIUS, and Y. CHEN, *Eurotherm 75, Microscale Heat Transfert 2, 8-10 juillet, Reims, France* (2003).
- [553] D. FOURNIER, C. FRÉTIGNY, V. REITA, J. P. ROGER, C. DE BEAUMONT, S. CRISTOLOBEANOU, and H. MORICEAU, *14th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 6-9 janvier, Le Caire, Egypte* (2007).
- [554] A. FRAGOLA, L. AIGOUY, and A. C. BOCCARA, *Focus on Microscopy, 13-16 avril, Gênes, Italie* (2003).
- [555] L. R. DE FREITAS, A. M. MANSANARES, G. TESSIER, and D. FOURNIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [556] S. GRÉSILLON, *Max-Planck Institut für Biochemie seminar, 27 juin, Martinsried, Allemagne* (2007).
- [557] S. GRÉSILLON, *Seminar der Lehrstuhl für photonik und Optoelektronik, 25 juin, Munich, Allemagne* (2007).
- [558] S. GRÉSILLON, *Quantum technology and optical processes in semiconductor nanostructures EQUONT-3, 19-23 septembre, Cambridge, Angleterre* (2004).
- [559] K. GRIEVE, M. ATLAN, G. MONERON, A. DUBOIS, B. C. FORGET, F. RAMAZ, and A. C. BOCCARA, *Colloque IMVIE (Imagerie pour les Sciences du Vivant et la Médecine), 15-18 septembre, Strasbourg, France* (2003).
- [560] M. GROSS, M. ATLAN, F. RAMAZ, B. C. FORGET, and A. C. BOCCARA, *Opt Diag 2004, 11-13 Mai, Val de Grâce, Paris, France* (2004).
- [561] M. GROSS, F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Colloque Biophotonique (OpticsValley), 13 Décembre, Institut Curie, Paris, France* (2004).
- [562] N. HADDAD, J. P. ROGER, C. CHRISTOFIDES, and D. FOURNIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).

- [563] G. JEROSOLIMSKI, V. REITA, G. TESSIER, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil (2004).*
- [564] G. JEROSOLIMSKI, G. TESSIER, C. FILLOY, D. FOURNIER, and S. HOLÉ, *Microscale heat transfer, Eurotherm 75, 8-10 Juillet, Reims, France (2003).*
- [565] R. LECAQUE, S. GRESILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Femto 2004, 21-24 septembre, Porquerolles, France (2004).*
- [566] R. LECAQUE, S. GRESILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Forum des microscopies à sonde locale, 23-26 mars, Ax-les-thermes, France (2004).*
- [567] R. LECAQUE, S. GRESILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *GDR Ondes, 15-16 décembre, Dijon, France (2004).*
- [568] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *ICONIC 2005, 8-10 juin, Barcelone, Espagne (2005).*
- [569] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *3ème Journées THz, 10-13 mars, Aussois, France (2005).*
- [570] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Forum des Microscopies à sondes locales, 29 mars au 1 avril, Anglet, France (2005).*
- [571] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *1ères Journées du GDR THz, 27-28 juin, Montpellier, France (2005).*
- [572] R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *CLEO Europe, 12-17 juin, Munich, Allemagne (2005).*
- [573] B. LERIDON, *GDR Neem, Saclay, France (2006).*
- [574] B. LERIDON, *GDR Physique mésoscopique, La Grande Motte (2006).*
- [575] B. LERIDON, *SNS2004, "Spectroscopies in Novel superconductors, Sitges, Espagne (2004).*
- [576] B. LERIDON, *M2S-HTSC, Rio de Janeiro, Brésil (2003).*
- [577] B. LERIDON, A. DEFOSSEZ, J. LESUEUR, and J. P. CONTOUR, *HTS04, janvier, Miami, USA (2004).*
- [578] B. LERIDON, J. LESUEUR, and M. APRILI, *APS March meeting, Los Angeles, USA (2005).*
- [579] B. LERIDON, T.-K. NG, and C. M. VARMA, *APS March meeting, Baltimore, USA (2006).*
- [580] B. LERIDON, J. VANACKEN, T. WAMBECQ, and V. V. MOSHCHALOV, *APS March meeting, Denver, USA (2007).*
- [581] M. LESAFFRE, F. JEAN, P. DELAYE, G. ROOSEN, M. GROSS, and F. RAMAZ, *Journée du Club Photonique et Sciences du Vivant, 30 novembre, ESPCI, Paris, France (2006).*

- [582] M. LESAFFRE, F. JEAN, F. RAMAZ, and M. GROSS, *EOS 2006 meeting, 16-18 octobre, Paris, France* (2006).
- [583] M. LESAFFRE, F. JEAN, F. RAMAZ, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Journée d'imagerie optique non conventionnelle, 14-15 mars, ESPCI, Paris, France* (2006).
- [584] M. LESAFFRE, F. RAMAZ, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Colloque Opt-Diag, 15-16 mai, Hôpital du Val de Grâce, Paris, France* (2007).
- [585] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *GDR « oxydes » Toulouse, France* (2004).
- [586] J. LESUEUR, N. BERGEAL, M. APRILI, T. KONTOS, M. SIRENA, G. FAINI, and J. P. CONTOUR, *APS meeting, Denver, USA* (2007).
- [587] J. LESUEUR, X. GRISON, and M. APRILI, *M2S SHTc conference, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [588] J. LESUEUR, X. GRISON, and M. APRILI, *M2S SHTc conference, Rio de Janeiro, Brésil* (2003).
- [589] Z. LIU, A. BOLTASSEVA, R. M. BAKKER, S. GRESILLON, H.-K. YUAN, A. V. KILDISHEV, V. P. DRACHEV, and V. M. SHALAEV., *Frontiers in Optics 2007 / Laser Science XXIII conferences, 16-20 septembre, San José, Californie, USA* (2007).
- [590] S. MARCHAND, A. TROKINER, A. KNIZHNIK, and G. KLOTZSCHE, *Réunion du GDR « NEEM », Nouveaux Etats Electroniques de la Matière, 29 juin-2 juillet, Aspet, France* (2004).
- [591] G. MONERON, A. FRAGOLA, F. FORMANEK, L. WILLIAME, A. DUBOIS, L. AIGOUY, Y. DE WILDE, S. GRÉSILLON, and A. C. BOCCARA, *International Nanophotonics Symposium, 24-26 juillet, Handai, Japon* (2003).
- [592] G. MONERON, S. GRÉSILLON, A. DUBOIS, and A. C. BOCCARA, *West Photonics 2004, 24-29 janvier, San José, Californie, USA* (2004).
- [593] V. OGLOBLICHEV, Y. PISKUNOV, A. TROKINER, A. YAKUBOVSKY, and S. VERKHOVSKII, *Gordon Research Conferences, Superconductivity, 9-14 septembre, Les Diablerets, Suisse* (2007).
- [594] V. OGLOBLICHEV, A. POGUDIN, S. VERKHOVSKII, and A. TROKINER, *International Conference EUROMAR/EENC-2005 : "Magnetic Resonance for the Future", Veldhoven, Pays-bas* (2005).
- [595] A. POGUDIN, V. OGLOBLICHEV, Y. PISKUNOV, A. TROKINER, and A. YAKUBOVSKY, *International Symposium "NMR in condensed matter", 12-16 juillet, Saint Petersburg, Russie* (2004).
- [596] A. POGUDIN, Y. PISKUNOV, V. OGLOBLICHEV, S. VERKHOVSKII, A. YAKUBOSKY, and A. TROKINER, *NanoRes-2004 : "Nanoscale properties of condensed matter probed by Resonance Phenomena", 15-19 Août, Kazan, Taterstan, Russie* (2004).
- [597] A. POURRET, H. AUBIN, J. LESUEUR, K. BEHNI, C. A. MARRACHE-KIKUCHI, L. BERGE, and L. DUMOULIN, *APS March Meeting 2004, mars, Los Angeles, USA* (2007).

- [598] F. RAMAZ, B. C. FORGET, M. ATLAN, A. C. BOCCARA, M. GROSS, P. DELAYE, and G. ROOSEN, *Réunion du GDR IMCODE, 9 décembre, ESPCI, Paris, France* (2004).
- [599] F. RAMAZ, B. C. FORGET, E. BOSSY, M. GROSS, and A. C. BOCCARA, *10ème Journée de la Matière Condensée (MC14O2), Session Imagerie, Communication et Désordre – 28 août -1er septembre, Toulouse, France* (2006).
- [600] S. SAADA and J. P. ROGER, *J3N2007, Journées du Réseau National Nanosciences et Nanotechnologies, 25-27 novembre, Paris, France* (2007).
- [601] B. SAMSON, L. AIGOUY, G. TESSIER, P. LOW, B. KIM, C. BERGAUD, and M. MORTIER, *Phonons 2007, juillet, Paris, France* (2007).
- [602] B. SAMSON, L. AIGOUY, G. TESSIER, P. LÖW, B. KIM, C. BERGAUD, and M. MORTIER, *10ème Forum des Microscopies à Sonde Locale, 26-29 mars, Forêt d'Orient, France* (2007).
- [603] B. SAMSON, L. AIGOUY, G. TESSIER, and M. MORTIER, *9ème Forum des microscopies à sonde locale, 27-31 mars, Autrans, France* (2006).
- [604] L. SUI, E. BOSSY, T. W. MURRAY, and A. R. ROY, *148th Meeting of the Acoustical Society of America, 15-19 Novembre, San Diego, NY, USA* (2004).
- [605] M. TALMANT, E. BOSSY, and P. LAUGIER, *148th Meeting of the Acoustical Society of America, 15-19 Novembre, San Diego, NY, USA* (2004).
- [606] G. TESSIER, C. FILLOY, M. L. POLIGNANO, I. MICA, G. JÉROSOLIMSKI, S. HOLÉ, and D. FOURNIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [607] G. TESSIER, J. JUMEL, D. ROCHAIS, F. ENGUEHARD, and D. FOURNIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [608] G. TESSIER, M. RASHIDI HUYEH, M. BARDOUX, and B. PALPANT, *14th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 14), 6-9 janvier, Le Caire, Egypte* (2007).
- [609] G. TESSIER, A. SALHI, Y. ROUILLARD, F. GENTY, J. P. ROGER, and D. FOURNIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [610] G. TESSIER, E. SEPULVEDA, S. HOLÉ, C. FILLOY, and D. FOURNIER, *13th International conference on photoacoustic and photothermal phenomena (ICPPP 13), 5-8 juillet, Rio de Janeiro, Brésil* (2004).
- [611] S. VERKHOVSKII, A. POGUDIN, V. OGLOBLICHEV, Y. PISKUNOV, A. TROKINER, and A. YAKUBOVSKY, *International ICAM Workshop NMR/EPR of Correlated Electron Superconductors, 15-21 octobre* (2005).
- [612] L. WILLIAME, S. DUCOURTIEUX, S. GRÉSILLON, and J. C. RIVOAL, *GDR Ondes, 14 janvier, Paris, France* (2003).

- [613] L. WILLIAME and S. GRÉSILLON, *Forum des microscopies à sonde locale, 23-26 mars, Ax-les-thermes, France* (2004).
- [614] L. WILLIAME, S. GRÉSILLON, S. DUCOURTIEUX, J. C. RIVOAL, and A. C. BOCCARA, *Forum des microscopies à sonde locale, 25-28 mars, La Grande Motte, France* (2003).
- [615] L. WILLIAME, R. LECAQUE, S. DUCOURTIEUX, S. GRÉSILLON, A. C. BOCCARA, J. C. RIVOAL, and H. CORY, *8th International Conference on Near-Field Nano Optics & Related Techniques NFO-8, 5-9 septembre, Séoul, Corée* (2004).
- [616] L. WILLIAME, R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, E. FORT, J.-C. RIVOAL, and C. BOCCARA, *IQEC-CLEO Pacific 2005, 11-15 juillet, Tokyo, Japon* (2005).
- [617] L. WILLIAME, R. LECAQUE, S. GRÉSILLON, E. FORT, J.-C. RIVOAL, and C. BOCCARA, *ICONIC 2005, 8-10 juin, Barcelone, Espagne* (2005).

## 6.6 Ouvrages scientifiques (ou chapitres)

- [618] L. AIGOUY, Y. DE WILDE, and C. FRÉTIGNY, *Collection Echelles* (2006).
- [619] K. BEHNIA, *Institute of Physics* (2003).
- [620] S. DILHAIRE, G. TESSIER, and D. FOURNIER, *CNRS* (2007).
- [621] P. LAUGIER, E. BOSSY, F. JENSON, F. PADILLA, and M. TALMANT, *M. Faupel, P. Smigielski, R. Gryzmala, FontisMedia, Lausanne* (2004).
- [622] G. MONERON, A. FRAGOLA, F. FORMANEK, L. WILLIAME, A. DUBOIS, Y. DE WILDE, S. GRESILLON, , and A. C. BOCCARA, *Elsevier* **1**, 139 (2004).

## 6.7 Ouvrages de vulgarisation (ou chapitres)

- [623] K. BEHNIA, *Institute of Physics* (2003).
- [624] C. FILLOY, *A paraître dans Sensor review* (2007).

## 6.8 Directions d'ouvrages

## 6.9 Autres publications

- [625] N. BONTEMPS and C. SIMON, *Supraconducteurs haute température critique : vingt ans après ... , Images de la Physique 2005* , 9 (2005).
- [626] Y. DE WILDE, *Chaud les nanos, Interview pour le Journal du CNRS (avril)* **207** (2007).
- [627] Y. DE WILDE, *Getting of the root of diffusion, Interview pour la revue Biophotonics International (février)* (2007).

- [628] Y. DE WILDE, *Optical Microscopy Is Pushed Beyond Diffraction Limits*, Interview audio pour *Semiconductor International Magazine* (avril) (2007).
- [629] Y. DE WILDE, *Une caméra infrarouge pour le nanomonde*, Interview pour la revue *La Recherche* (février) **405** (2007).
- [630] Y. DE WILDE, *How to build a nanoscopic version of a night-vision camera*, Interview pour la revue *NATURE* **444**, xiii (2006).
- [631] Y. DE WILDE, *Thermal Radiation STM feels the heat*, Interview pour la revue *Nanotechweb.org* (décembre) (2006).
- [632] A. DUBOIS, L. AIGOUY, and Y. DE WILDE, *Infiniment petit : la microscopie optique rejoint la course*, Interview pour le "Magazine Science et Vie - Hors Série", *Pour La Science* **228**, 128 (2004).

## 6.10 Autres activités internationales

- [633] N. BONTEMPS, *Professeur Invité à l'Université de Tokyo, Campus Kashiwa* (2006).
- [634] N. BONTEMPS, *Responsable du Noeud Parisien du réseau Européen d'Excellence SCENET2 (2002/2006)* (2003).
- [635] N. BONTEMPS, J. ALLEN, V. BROUET, and A. CHUBUKOV, *Organisation du Colloque I2CAM advanced workshop - Strongly Correlated Electrons : Diverse examples and unifying themes. 8-20 août, Cargèse, France* (2005).
- [636] N. BONTEMPS and P. CALVANI, *Organisation du Colloque : Optical Sumrules : Their relevance to high Tc superconductors and correlated systems, 2-3 juillet, Rome, Italie* (2007).
- [637] N. BONTEMPS and F. C. ZHAN, *Organisation du Colloque : 2007 Gordon Conference on Superconductivity, 9-14 septembre, Les Diablerets, Suisse* (2007).
- [638] E. BOSSY, *Co-organisateur d'une session spéciale de la conférence SFA/ASA, Paris en Juillet 2008 : "Light and Sound in Medical Imaging and Therapy"* (2008).
- [639] E. BOSSY, *Membre du comité scientifique du 2nd European Symposium on Ultrasonic Characterization of Bone (ESUCB)* (2007).
- [640] E. BOSSY, *Membre du comité technique "Ultrasound/Bioresponse to Vibration" de la Société Américaine d'Acoustique (ASA)* (2006).
- [641] S. DAVID and N. BONTEMPS, *Organisation du Colloque : 2006 Gordon Conference on Superconductivity, 22-27 janvier, Buellton, Ca, USA* (2006).
- [642] G. TESSIER, *Organisation de la Conférence internationale QMTIA'05, Paris, France* (2005).
- [643] G. TESSIER, *Organisation du minicolloque "Micro et Nano Thermique" aux Journées de la Matière Condensée (JMC9), Nancy, France* (2004).
- [644] G. TESSIER, *Participation à l'organisation de l'école d'été "Micro et Nano Thermique", Aussois, France* (2004).



- [645] G. TESSIER, *Membre du Comité scientifique d'Eurotherm 75* (2003).
- [646] A. TROKINER, *Membre du bureau scientifique du GDR NEEM (Nouveaux Etats Electroniques de la Matière) (2004-2007)* (2004).

## 6.11 Information et culture scientifique et technique

- [647] K. BEHNIA, *Entretien avec le journal de la Recherche (septembre)* (2007).
- [648] G. MONERON, K. GRIEVE, M. ATLAN, F. RAMAZ, V. LORIETTE, B. C. FORGET, A. DUBOIS, and A. C. BOCCARA, *Les Nouvelles d'Archimède, journal culturel de l'Université des Sciences et Technologies de Lille* **38** (2005).
- [649] F. RAMAZ, M. GROSS, B. C. FORGET, and A. C. BOCCARA, *Pour la Science* (2005).
- [650] J. P. ROGER, *Lumière, le magazine d'Opticsvalley* **9** (2004).
- [651] J. SELB, B. C. FORGET, F. RAMAZ, and A. C. BOCCARA, *Images de la Physique, numéro spécial année mondiale de la Physique, EDITIONS du CNRS*, 152 (2005).

## 6.12 Valorisation : contrats de recherche, partenariat industriel, créations d'entreprises

- [652] E. BOSSY, *ANR Jeunes Chercheurs (investigateur principal) obtenu en Juillet 2007 (Montant 140 000 euros), "Photoacoustic Guided High-Intensity Focused Ultrasound, PAG-HIFU"* (2007).
- [653] Y. DE WILDE, *Participation à une ANR PNANO "Spectroscopie à transformée de Fourier résolue spatialement à l'échelle de 100 nanomètres"* (2007).
- [654] Y. DE WILDE, *Participation à une Action concertée Nanosciences "Vers un laser à plasmons de surface"* (2004).
- [655] B. DUBERTRET, *BQR Paris VI (2005-2008)* (2005).
- [656] B. DUBERTRET, *Participation à l'ANR BRIO (2005-2008)* (2005).
- [657] B. DUBERTRET, *Participation à l'ANR VISEN (2005-2008)* (2005).
- [658] B. DUBERTRET, *Bourse "Human Frontier Science Programme, Youg Investigator's Grant" (2004-2007)* (2004).
- [659] B. DUBERTRET, *Projet SESAME de la Région Ile-de-France (2004-2006)* (2004).
- [660] B. DUBERTRET, *ACI Jeunes Chercheurs (2003-2006)* (2003).
- [661] B. DUBERTRET, *Prix de la Société des Amis de l'ESPCI* (2003).
- [662] M. GROSS, F. RAMAZ, B. C. FORGET, P. DELAYE, G. ROOSEN, and A. C. BOCCARA, *Brevet CNRS - Université Paris VI : "Procédé et installation acousto-optique", 17 juin 2004, dépôt légal : 0406592. Etendu à l'international en 2006* (2004).
- [663] S. HOLÉ, C. FILLOY, and D. FOURNIER, *Brevet CNRS/UPMC FR 0405957* (2004).

- [664] J. LAVAL, *ACI Nanosciences, Nanodomains ferroélectriques 2004-2007* (2004).
- [665] J. LESUEUR, *Demande de brevet déposé aux USA :11/610,972 : "An electrical device and method of manufacturing same"* (2006).
- [666] J. P. ROGER, D. FOURNIER, E. SEPULVEDA, and G. TESSIER, *l'ANR PNANO Diatherm : "Développement d'une technologie de dépôt de diamant en film mince et application dans une filière substrats Silicon On Diamond (SOD) pour l'amélioration du management thermique"* (2005-2009) (2007).
- [667] G. TESSIER, *Participation au contrat PREI DGA "Thermique des Transistors GaN"* (2007-2009) (2007).
- [668] G. TESSIER, *Participation à l'ANR PNANO NanoThermoFluo* (2007-2009) (2007).
- [669] G. TESSIER, *Participation à l'ANR PNANO : 3D NanoBioCell* (2006-2008) (2006).
- [670] G. TESSIER and C. FILLOY, *Participation à l'ANR PNANO EThNa* (2007-2009) (2007).
- [671] G. TESSIER and C. FILLOY, *Participation au contrat Européen MICROTHERM* (2003-2006) (2003).
- [672] A. TROKINER, *Programme PARROT (Franco-Estonien). « Etudes de propriétés magnétiques, électroniques, catalytiques et supraconductrices dans des oxydes complexes » En collaboration avec l'équipe du Dr. R. Stern, National Institute of Chemical Physics and Biophysics, Tallin.* (2003-2005) (2003).

# Table des matières

<b>1 Nanophysique, Nanostructures et Nanomatériaux</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	3
1.2 Nanophysique	5
1.2.1 Plasmonique et ondes de surface	5
1.2.1.1 Microscopie optique en champ proche dans l'infrarouge moyen	6
1.2.1.2 Le microscope à effet tunnel à rayonnement thermique	7
1.2.1.3 Nano-ouvertures et ondes de surface	7
1.2.1.4 Localisations et exaltations	9
1.2.2 Champ proche optique autour de nano-objets individuels	10
1.2.2.1 Champ évanescent autour de nanoparticules métalliques et diélectriques	10
1.2.2.2 Nano-objets circulaires et nano-cristaux : effets de polarisation linéaire et non-linéaire	11
1.2.3 Micro et nanomécanique	12
1.2.4 Micro et nanothermique	13
1.2.4.1 Conductivité thermique de structures SOI	14
1.2.4.2 Semi-conducteurs : silicium épitaxié	15
1.2.4.3 Déterminations découplées de la diffusivité et de la conductivité thermiques d'une couche mince	15
1.2.4.4 Détection et spectroscopie de nano objets métalliques	16
1.2.4.5 Dilatation thermique et fusion de nanoparticules métalliques	16
1.3 Nanostructures et nanomatériaux	17
1.3.1 Synthèse et caractérisation de quantum dots	17
1.3.2 Nanojonctions Josephson à Haute Tc	19
1.3.3 Nanostructures semi-conductrices et ferroélectriques : microscopie électronique en transmission	21
1.3.3.1 Activité électrique locale et nanoanalyse de champs électriques de diodes IMPATT et Schottky	21
1.3.3.2 Couches minces ferroélectriques de niobates (SrBi <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>9</sub> et PbMg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> O <sub>3</sub> )	22
<b>2 Electrons en interaction</b>	<b>25</b>
2.1 Études Thermoélectriques	25
2.1.1 Limites de validité de la loi Wiedemann-Franz dans les cuprates	25
2.1.2 La criticalité quantique et ses signatures thermoélectriques	26

2.1.3	Fluctuations dans les supraconducteurs amorphes . . . . .	26
2.1.4	Les ordres cachés dans les métaux aux électrons lourds . . . . .	28
2.1.5	L'effet Nernst des semi-métaux et la réfrigération cryogénique . . . . .	28
2.1.6	Bismuth au-delà de la limite quantique . . . . .	29
2.2	Cuprates, Corrélations, Fluctuations, etc . . . . .	29
2.2.1	Test direct des fluctuations de paires dans un cuprate sous-dopé . . . . .	29
2.2.2	Fluctuations dans les cuprates supraconducteurs . . . . .	30
2.2.3	Energie cinétique des états Normal et Supraconducteur . . . . .	31
2.2.4	Corrélations électroniques dans les Cuprates . . . . .	32
2.2.5	Conductivité optique des cuprates dopés aux électrons . . . . .	33
2.2.6	Effet Josephson pour des supraconducteurs brisant la symétrie par renversement du temps et la symétrie d'inversion . . . . .	34
2.2.7	Etude locale d'inhomogénéités dans des cuprates supraconducteurs . . . . .	35
2.3	Composés Magnétiques . . . . .	36
2.3.1	Etude du système $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$ . . . . .	36
2.3.2	Propriétés locales des manganites . . . . .	36
2.4	FerroSupra . . . . .	37
2.4.1	Injection de spins dans un supraconducteur conventionnel . . . . .	37
2.4.2	Spins artificiels . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Imagerie des milieux complexes</b> . . . . .	<b>41</b>
3.1	Introduction . . . . .	41
3.2	Tomographie optique cohérente . . . . .	41
3.3	Imagerie par couplage lumière-ultrasons . . . . .	42
3.3.1	Holographie numérique hétérodyne hors-axe . . . . .	43
3.3.1.1	Application à l'imagerie acousto-optique . . . . .	43
3.3.1.2	Application à la spectroscopie de la lumière diffuse . . . . .	44
3.3.2	Nouveaux modes d'imagerie lumière-ultrasons . . . . .	45
3.3.2.1	Holographie rapide par adaptation du front d'onde pour l'ima- gerie acousto-optique . . . . .	45
3.3.2.2	Opto-élastographie . . . . .	46
3.3.2.3	Renversement temporel d'ondes photoacoustiques . . . . .	47
3.3.2.4	Modélisation d'ondes acoustiques et milieux complexes . . . . .	48
3.4	Imagerie thermique de circuits intégrés . . . . .	48
3.4.1	Imagerie de thermoréfectance . . . . .	49
3.4.1.1	Thermoréfectance sous illumination visible . . . . .	49
3.4.1.2	Thermoréfectance à haute fréquence . . . . .	50
3.4.2	Imagerie de circuits intégrés . . . . .	50
3.4.2.1	Application aux VCSELs . . . . .	50
3.4.2.2	Thermoréfectance proche infrarouge à résolution sub- dif- fraction . . . . .	51
3.4.3	Nouveaux développements d'imagerie thermique haute résolution . . . . .	51

3.4.3.1	Imagerie infrarouge . . . . .	51
3.4.3.2	Sonde fluorescente à balayage pour la cartographie de températures . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Instruments et méthodes</b>	<b>55</b>
4.1	Introduction . . . . .	55
4.2	Nouvelles méthodes d'imagerie . . . . .	56
4.2.1	Développement de techniques 3D en microscopie optique . . . . .	56
4.2.1.1	Microscope confocal plein champ . . . . .	56
4.2.1.2	Technique de microscopie plein champ par modulation de la position de l'objectif . . . . .	56
4.2.1.3	Illumination structurée 3D . . . . .	57
4.2.2	Sondes locales multiples pour l'imagerie 3D . . . . .	57
4.2.3	Lecture de mémoires 3D par OCT . . . . .	58
4.2.4	Imagerie et spectroscopie Terahertz : Champ proche et ultra-proche .	59
4.2.5	Imagerie infrarouge . . . . .	60
4.2.5.1	Applications en contrôle non destructif . . . . .	60
4.2.5.2	Imagerie infrarouge synchrone : mesure de la diffusivité thermique de matériaux . . . . .	60
4.3	Instrumentation . . . . .	61
4.3.1	Micro et nanomanipulations : sondes fluorescentes à balayage . . . . .	61
4.3.2	Microscope optique en champ proche et STM à rayonnement thermique . . . . .	61
4.3.3	Localisation latérale d'un véhicule automobile par bande magnétique	62
4.3.4	Métrologie pour Virgo . . . . .	63
4.3.4.1	Pourquoi une nouvelle métrologie? . . . . .	63
4.3.4.2	Microscope confocal à lentille thermique (mesures d'absorption) . . . . .	63
4.3.4.3	Tomographie optique cohérente en lumière polarisée (mesures de diffusion) . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Les perspectives scientifiques du Laboratoire Photons Et Matière</b>	<b>67</b>
5.1	Introduction . . . . .	67
5.2	Ondes en milieu complexe et imagerie bio-médicale . . . . .	70
5.2.1	Introduction . . . . .	70
5.2.2	Tomographie optique cohérente : OCT et optique adaptative . . . . .	71
5.2.3	Imagerie par couplage de la lumière et des ultra-sons (US) . . . . .	71
5.2.3.1	L'approche par "opto-élastographie" . . . . .	71
5.2.3.2	Retournement temporel d'ondes photoacoustiques . . . . .	71
5.2.3.3	Holographie rapide par adaptation du front d'onde . . . . .	72
5.2.4	Nanosondes pour l'imagerie biomédicale super-résolue . . . . .	73
5.2.4.1	Synthèse de nanocristaux bio-compatibles pour la microscopie super-résolue . . . . .	73

5.2.4.2	Synthèse de sondes multimodales pour l'imagerie in-vivo . . .	74
5.2.4.3	Nanosondes et illumination structurée . . . . .	75
5.2.4.4	Détection optique de nano objets métalliques . . . . .	75
5.2.5	Puces à ADN . . . . .	76
5.2.5.1	Imagerie plasmonique biomédicale . . . . .	76
5.2.5.2	Nanomécanique pour la détection d'ADN . . . . .	77
5.2.6	Relaxation RMN à bas champ . . . . .	77
5.3	Electrons en interactions . . . . .	78
5.3.1	Introduction . . . . .	78
5.3.2	Etude des oxydes . . . . .	79
5.3.2.1	Diagramme de phase des cuprates . . . . .	79
5.3.2.2	Etude des manganites . . . . .	79
5.3.2.3	Les matériaux multiferroïques . . . . .	80
5.3.3	Systèmes électroniques confinés et fluctuations . . . . .	80
5.3.3.1	Supraconducteurs en dimension réduite et Transition Supra- Isolant . . . . .	81
5.3.3.2	Conducteurs de basse dimension et transition Métal-Isolant	81
5.3.3.3	Isolants d'Anderson . . . . .	82
5.3.4	Criticalité quantique et nouveaux ordres électroniques dans les fer- mions lourds . . . . .	82
5.3.5	Applications : électronique cryogénique et spintronique . . . . .	82
5.4	Nanophysique, nanostructures et nanomatériaux . . . . .	83
5.4.1	Introduction . . . . .	83
5.4.2	Imagerie plasmonique . . . . .	83
5.4.2.1	Mesurer la densité électromagnétique locale . . . . .	83
5.4.2.2	Imager les plasmons : fluorescence de nano objets . . . . .	84
5.4.2.3	Nano-antennes, méta-matériaux et lentilles de Pendry . . . . .	85
5.4.2.4	Fabriquer des systèmes plasmoniques : bio-inspiration . . . . .	85
5.4.3	Nanothermique . . . . .	86
5.4.3.1	Microscope à photoréflectance : caractérisation thermique de couches minces et de nanoobjets . . . . .	86
5.4.3.2	Utilisation de nanosondes fluorescentes . . . . .	86
5.5	Caractérisation des matériaux et des systèmes . . . . .	87
5.5.1	Introduction . . . . .	87
5.5.2	Tomographie optique cohérente plein champ : OCT . . . . .	87
5.5.3	Imagerie thermique de Circuits Intégrés en fonctionnement . . . . .	87
5.5.3.1	Imagerie de thermoréflectance : application à l'échauffement de CI . . . . .	87
5.5.3.2	Etude de lasers à cascade quantique . . . . .	88
5.5.4	Le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo . . . . .	88
5.5.5	Imagerie thermique haute résolution . . . . .	89
5.5.6	La microscopie électronique en transmission TEM . . . . .	89

<b>6 Bibliographie</b>	<b>91</b>
6.1 Articles dans des revues avec comité de lecture . . . . .	91
6.2 Articles dans des revues sans comité de lecture . . . . .	104
6.3 Conférences invitées . . . . .	105
6.4 Communications avec actes . . . . .	113
6.5 Communications sans actes . . . . .	120
6.6 Ouvrages scientifiques (ou chapitres) . . . . .	127
6.7 Ouvrages de vulgarisation (ou chapitres) . . . . .	127
6.8 Directions d'ouvrages . . . . .	127
6.9 Autres publications . . . . .	127
6.10 Autres activités internationales . . . . .	128
6.11 Information et culture scientifique et technique . . . . .	129
6.12 Valorisation : contrats de recherche, partenariat industriel, créations d'en- treprises . . . . .	129