



energie atomique • énergies alternatives



UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11



Coup de projecteur sur les supraconducteurs

une journée de visite dans les laboratoires du campus Paris-Saclay

Visite de Presse – jeudi 10 mars 2011

CONTACTS PRESSE :

Presse CEA | **Coline Verneau** | 01 64 50 14 88 | coline.verneau@cea.fr

Marie Vandermersch | 01 64 50 17 16 | marie.vandermersch@cea.fr

Presse CNRS | **Claire Le Poulenec** | T 01 44 96 49 88 | claire.le-poulenec@cnrs-dir.fr

Presse Université Paris-Sud 11 | **Cécile Pérol** | 01 69 15 41 99 | cecile.perol@u-psud.fr

SOMMAIRE

Introduction	3
Recherche fondamentale dans le domaine de la supraconductivité	6
Le Laboratoire de physique des solides (LPS), unité mixte Université Paris-Sud 11/CNRS	6
<i>Les nouveaux supraconducteurs et la RMN</i>	6
<i>La supraconductivité à l'échelle nanométrique</i>	8
Le Laboratoire Léon Brillouin (LLB), unité mixte CEA/CNRS	9
<i>Supraconductivité et spectroscopie neutronique</i>	10
Quelques grandes applications de la supraconductivité	11
La Plateforme Supratech (CEA/CNRS) : conception et élaboration des cavités accélératrices supraconductrices	11
La Route des Aimants Supraconducteurs (CEA-Irfu)	13
Supraconductivité et santé : <i>IRM bas champ, magnétoencéphalographie (MEG) et magnétocardiographie (MCG) au Service de physique de l'état condensé (SPEC Unité de Recherche Associée CEA-Iramis/CNRS)</i>	16
ANNEXES	18

Introduction

Il y a 100 ans, le 8 avril 1911, le physicien Heike Kammerlingh-Onnes mettait en évidence le phénomène de supraconductivité qui confère à certains matériaux des propriétés inédites : refroidis à très basse température, les supraconducteurs deviennent de parfaits conducteurs électriques et expulsent le champ magnétique qui les traverse, pouvant ainsi induire des effets spectaculaires de lévitation. La supraconductivité est un des rares exemples où la physique quantique s'applique à grande échelle. Repoussant les limites de la physique théorique, elle a ouvert la voie à un vaste champ de recherche, qui met en jeu la physique des solides et s'étend même bien au delà, de la nanophysique aux gaz atomiques ultra-froids.

La compréhension et la maîtrise de ses principes ont débouché sur de nombreuses applications. L'IRM, qui a révolutionné le diagnostic médical et la compréhension du cerveau, repose sur la maîtrise de ce phénomène. Les transports, les télécommunications, l'électronique, l'informatique, la géophysique, ou encore l'archéologie peuvent également exploiter ses propriétés. En outre, sans supraconducteurs, les très grands instruments de recherche tels que le LHC aujourd'hui ou l'ITER demain ne pourraient voir le jour.

Aujourd'hui, la plupart des applications de la supraconductivité supposent de descendre à des températures proches du zéro absolu. La découverte, depuis les années 1980, des supraconducteurs à haute température critique (haut-T_c), qui nécessitent un moindre refroidissement, change la donne et ouvre de nouveaux champs d'applications, certaines d'entre elles commencent d'ailleurs à sortir des laboratoires. Comprendre les propriétés et les mécanismes de fonctionnement de ces matériaux qui déjouent toute attente est un enjeu majeur des recherches actuelles. Et si la supraconductivité à température ambiante reste pour l'instant un rêve de chercheur, les supraconducteurs n'ont pas fini de bousculer la physique théorique.

Qu'est-ce que la supraconductivité ?

A l'état supraconducteur, un matériau refroidi à très basse température acquiert la capacité de conduire parfaitement un courant électrique, sans **résistivité**, et donc sans perte d'énergie. De même, à l'état supraconducteur, les matériaux possèdent la propriété d'expulser totalement le champ magnétique qui les entoure, ce qui peut être caractérisé par des effets de lévitation magnétique.

Traduit par des propriétés électriques, magnétiques et quantiques spécifiques, le phénomène de supraconductivité apparaît lorsque l'on refroidit certains métaux ou alliages à très basse température, proches du zéro absolu, soit -273°C . Appelée **température critique** (T_c), cette température à laquelle le matériau devient supraconducteur varie en fonction de la composition chimique. Pour la plupart des matériaux, dits supraconducteurs conventionnels, elle se situe entre 1 et 33 Kelvin (soit entre -272 et -253°C), ce qui nécessite un refroidissement à l'hélium liquide. Depuis 1986, des oxydes de cuivres ou cuprates, appelés **supraconducteurs à haute température critique (haut- T_c)**, peuvent être refroidis à l'azote liquide (à 77 K soit -196°C). Ce sont les cuprates de mercure qui détiennent actuellement le record de température critique : 135 K (-138°C). En 2008, des scientifiques ont réussi à synthétiser une nouvelle famille de supraconducteurs à haute température critique : les pnictures ($T_c = 55\text{K}$, soit -218°C). Possédant des propriétés différentes des cuprates, ces matériaux suscitent également beaucoup d'intérêt depuis leur découverte.

Quelle est l'origine de la supraconductivité ?

La supraconductivité est un phénomène quantique collectif. Dans les matériaux supraconducteurs classiques, les électrons se regroupent par paires (dites paires de Coopers), en utilisant les atomes présents autour d'eux, et forment ainsi une **vague collective**. L'onde ou vague électronique qu'ils créent se propage sans subir de collision dans la matière, et permet la conduite du courant sans perte d'énergie. Ce phénomène ne peut se produire qu'à basse température lorsque les atomes du matériau ne vibrent pas trop (sinon les électrons rebondiraient dans tous les sens). Les physiciens apparentent ce phénomène à la **superfluidité**, un état pour lequel un fluide s'écoule sans viscosité.

L'étude de la vague collective des électrons, dans l'état supraconducteur, permet de mieux appréhender les propriétés des matériaux supraconducteurs. Si les mécanismes à l'origine de la supraconductivité chez la majorité des matériaux, dits supraconducteurs conventionnels, sont élucidés depuis longtemps et bien compris, ce n'est pas le cas des supraconducteurs haute température

critique (cuprates et pnictures). Il s'agit d'un des principaux sujets de recherche actif dans le domaine de la supraconductivité qui oblige les physiciens à inventer différentes façons de mesurer ces matériaux et des concepts innovants pour les décrire. En synthétisant de nouveaux échantillons supraconducteurs et en analysant de près leurs propriétés, les chercheurs espèrent percer les derniers mystères de la supraconductivité afin d'arriver à l'obtention du même phénomène à **température ambiante**.

Les grandes dates de la supraconductivité :

1911 : Heike Kammerlingh-Onnes découvre que certains métaux refroidis à très basse température conduisent parfaitement le courant, sans résistivité : la supraconductivité est née.

1933 : Walter Meissner et Robert Ochsenfeld découvrent que les supraconducteurs ont la propriété d'expulser le champ magnétique environnant. Cette propriété a été appelée « effet Meissner ».

1957 : John Bardeen, Leon N. Cooper et John R. Schrieffer développent la théorie BCS qui permet de comprendre la supraconductivité dans les métaux et les alliages.

1957 : Alexei A. Abrikosov émet l'hypothèse de l'existence de vortex magnétiques dans certains supraconducteurs.

1962 : Brian David Josephson prédit l'effet Josephson : lorsque deux matériaux supraconducteurs sont proches l'un de l'autre, sans toutefois être en contact, le passage de paires d'électrons de l'un à l'autre par effet tunnel conduit à l'établissement d'un courant électrique.

1986 : Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller découvrent de nouveaux supraconducteurs à « haute température critique » (haut T_c), les cuprates.

2008 : Une équipe internationale de chercheurs découvre une nouvelle famille de matériaux supraconducteurs à haute température critique, les pnictures (à base de fer).

Recherche fondamentale dans le domaine de la supraconductivité

Le Laboratoire de physique des solides (LPS), unité mixte Université Paris-Sud 11/CNRS

www.lps.u-psud.fr

Au Laboratoire de physique des solides, les chercheurs s'intéressent aux nouveaux états électroniques de la matière, à la nanophysique et la matière molle. La supraconductivité y est très étudiée, depuis les travaux pionniers de Pierre Gilles de Gennes¹ dans les années 1960. De nombreuses découvertes importantes y ont été réalisées : dans les années 1980, la découverte de la supraconductivité dans des matériaux moléculaires (les cuprates), ainsi que celle du « pseudogap », une phase qui apparaît lors du refroidissement, avant la supraconductivité, et qui présente des propriétés électroniques anormales. Plus récemment, les chercheurs y ont mis en évidence pour la première fois la supraconductivité dans les nanotubes de carbone.

Les nouveaux supraconducteurs et la RMN

Les cuprates sont des oxydes lamellaires composés de cuivre et d'oxygène. Ils sont l'un des sujets les plus étudiés ces dernières années en physique. L'origine de leur supraconductivité et la température à laquelle elle apparaît (beaucoup plus élevée que dans les supraconducteurs classiques) restent énigmatiques. Leurs électrons se déplacent de façon corrélée, dans un mouvement difficile à décrire d'un point de vue théorique et tout aussi difficile à mesurer expérimentalement. Selon le nombre d'électrons qui y circulent, ils sont soit supraconducteurs, soit magnétiques (leurs électrons portent des moments magnétiques ordonnés à grande distance).

D'autres matériaux, les pnictures, composés lamellaires de fer et d'arsenic découverts en 2008, sont eux aussi supraconducteurs à relativement haute température. Pourtant, leur supraconductivité présente des propriétés différentes. Alors que dans les cuprates, un seul électron par cuivre joue un rôle et évite ses voisins, dans les pnictures, ce sont cinq électrons aux comportements différents qui participent aux propriétés de ces matériaux. Sur les pnictures, le LPS collabore avec le Service de physique de l'état condensé (SPEC) et le synchrotron SOLEIL : les matériaux sont synthétisés et mesurés du point de vue électrique au SPEC, puis du point de vue magnétique par résonance magnétique nucléaire (RMN) au LPS et par résonance Mossbauer au SPEC, et du point de vue des énergies et vitesses des électrons au synchrotron SOLEIL, avec le LPS. L'emploi de la résonance magnétique nucléaire (RMN) permet aux physiciens de progresser dans leurs recherches sur la supraconductivité haute Température critique.

¹ Prix Nobel de physique 1991, P.G. de Gennes notamment travaillé au LPS sur les effets de surface et d'interface dans les supraconducteurs, avant de se tourner vers les cristaux liquides.

Les chercheurs réalisent, avec la RMN, une image magnétique de l'échantillon, en mesurant le magnétisme dans le voisinage de chaque atome de fer. Ils ont montré que les pnictures peuvent être à la fois supraconducteurs et magnétiques : sur chaque atome de fer coexistent des électrons supraconducteurs et des moments magnétiques figés et ordonnés. C'est là un comportement curieux car normalement, le magnétisme détruit la supraconductivité. La RMN du laboratoire présente la particularité d'utiliser des champs magnétiques élevés (jusqu'à 14 Tesla, soit 300 000 fois le champ terrestre).



Le cylindre vert est une bobine pour produire un champ magnétique très élevé pour des mesures de résonance magnétique nucléaire (RMN). ©RAJAU Benoît (cette photo est disponible auprès de la photothèque du CNRS)

La supraconductivité à l'échelle nanométrique

Les supraconducteurs sont capables de transporter le courant électrique sans dissiper d'énergie. Cette propriété est aussi vraie à l'échelle du nanomètre. Et à cette échelle, on peut même rendre supraconducteurs des objets nanométriques qui ne le sont pas, pourvu qu'ils soient suffisamment courts : par exemple un fil métallique, un nanotube de carbone ou du graphène. Pour cela, on place le nano-objet entre deux plots supraconducteurs (« une jonction »). Dans ce cas, le nano-objet peut avoir un comportement supraconducteur vis-à-vis d'un courant électrique qui le traverse sans résistance, à condition que ce courant ne soit pas trop élevé. Les travaux réalisés au laboratoire permettent de comprendre ce qui détermine ce courant et la nature de la supraconductivité obtenue ici « par proximité ».

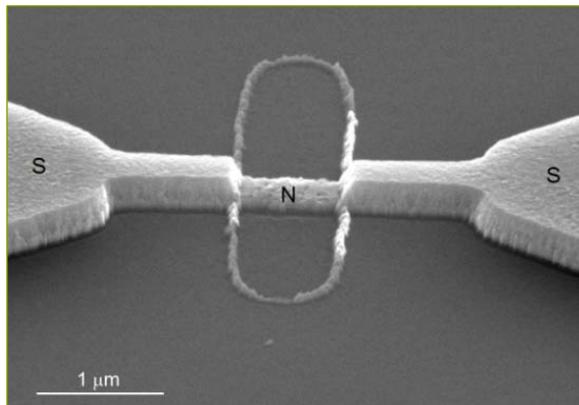


Image au microscope électronique à balayage d'une jonction constitué d'un fil d'or non supraconducteur (N) inséré entre deux contacts supraconducteurs (S) en niobium.

L'étude de la supraconductivité à l'échelle du nanomètre permet de mieux comprendre comment la supraconductivité peut s'étendre à un système non supraconducteur de taille nanométrique. Par ailleurs ces jonctions pourraient être utilisées dans l'électronique supraconductrice ou constituer les briques élémentaires d'une informatique quantique².

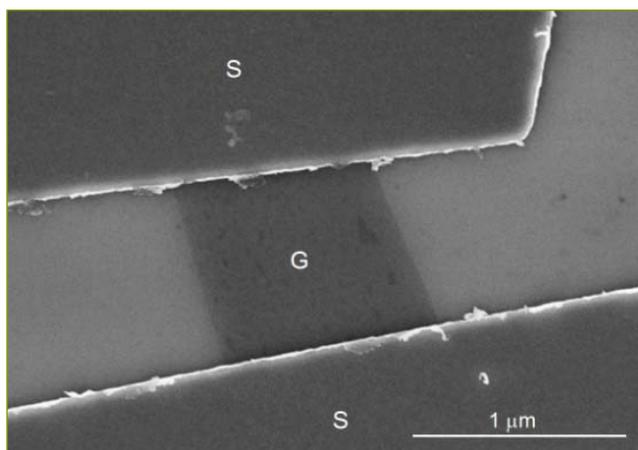


Image au microscope électronique à balayage d'une jonction constitué d'une feuille de graphène (G) insérée entre deux contacts supraconducteurs (S).

² Cf. Annexe « Pour aller plus loin... » : Demain l'ordinateur quantique ? (p.22)

Le Laboratoire Léon Brillouin (LLB), unité mixte CEA/CNRS

www.llb.cea.fr

Le Laboratoire Léon Brillouin et le réacteur Orphée ont pour mission de promouvoir l'utilisation de faisceaux de neutrons pour sonder la matière à une échelle microscopique. Les chercheurs du LLB, accueillent et assistent les équipes venant réaliser des expériences et conduisent des recherches sur des programmes scientifiques propres.

Le neutron est une particule bien adaptée à l'exploration de la matière. Cette particule électriquement neutre possède un grand pouvoir pénétrant. Elle est également dotée d'un moment magnétique, le spin, qui la rend sensible aux distributions de champs magnétiques à l'intérieur des matériaux. Le neutron se comporte comme une onde. Ces caractéristiques (direction de propagation, longueur d'onde, vitesse) sont modifiées par les matériaux qu'il traverse. On peut en déduire ce que les atomes et les moments magnétiques présents dans ces matériaux font dans l'espace et dans le temps. On détermine ainsi leurs structures atomiques et magnétiques, ainsi que leurs vibrations et fluctuations.

Le réacteur Orphée est un réacteur à fission d'une puissance de 14MW. Son cœur est plongé dans une piscine d'eau lourde. Il fournit des faisceaux de neutrons dont les énergies sont distribuées entre 1 et 100meV. Le réacteur abrite 25 spectromètres de recherche, qui reçoivent des faisceaux de neutrons à température ambiante, froids ou chauds. Les chercheurs utilisent ici la technique de spectroscopie neutronique pour effectuer des mesures sur différents matériaux supraconducteurs. Et c'est selon la grandeur à mesurer et la nature de l'échantillon que les physiciens vont déterminer quel est le spectromètre le plus adapté pour leur test.



Piscine du réacteur Orphée ©CEA

Supraconductivité et spectroscopie neutronique

Dans un supraconducteur, les électrons, qui normalement se repoussent, circulent par paire à l'intérieur du matériau. On parle de « glu » supraconductrice pour désigner le mécanisme responsable de cet appariement. Bien connu dans le cas des supraconducteurs conventionnels (il repose sur l'interaction des électrons avec les vibrations du cristal), il demeure mystérieux pour les supraconducteurs non conventionnels, même si l'on soupçonne qu'il résulte des fluctuations magnétiques engendrées par les électrons eux-mêmes. Au Laboratoire Léon Brillouin, les physiciens essaient de percer le mystère de la glu supraconductrice dans le cas des supraconducteurs non conventionnels (cuprates et pnictures), en utilisant la spectroscopie neutronique.

Cuprates et pnictures sont caractérisés par l'empilement de feuillets de cuivre et d'oxygène ou de fer et d'arsenic. En faisant varier la densité d'électrons dans les feuillets (en transférant des électrons à partir d'autres couches atomiques intercalées), on passe d'une phase magnétique à une phase supraconductrice. Ces deux phases peuvent même coexister dans certains composés. Lorsque les phases magnétiques ont totalement disparues, l'activité magnétique des matériaux ne s'arrête pas pour autant : il persiste des « fluctuations magnétiques ». La technique de spectroscopie neutronique permet d'identifier et de caractériser ces fluctuations magnétiques avant que les matériaux ne deviennent supraconducteurs. Ces fluctuations magnétiques joueraient un rôle dans le mécanisme d'appariement supraconducteur.

Si les pnictures apparaissent comme des matériaux prototypes pour étudier la supraconductivité d'origine magnétique, les cuprates semblent plus complexes, avec, à proximité de l'état supraconducteur, plusieurs états électroniques encore mystérieux. On ignore encore la nature exacte de ces états et s'ils sont amis ou ennemis de la supraconductivité. L'enjeu des mesures de spectroscopie neutronique est d'essayer de comprendre ce que sont ces états électroniques exotiques à partir de leur signature magnétique spécifique (sorte d'emprunte génétique) et de savoir dans quelle mesure les fluctuations qui leur sont associées peuvent entrer dans le mécanisme d'appariement supraconducteur.

Quelques grandes applications de la supraconductivité

La supraconductivité joue aujourd'hui un rôle prépondérant dans la conception et la réalisation des très grands instruments dédiés à l'exploration de la matière. Employée dans les accélérateurs de particules pour développer les électroaimants supraconducteurs qui dévient et focalisent les faisceaux, elle intervient également dans le domaine des cavités radiofréquence (RF) qui génèrent le champ électrique qui accélère les particules chargées au centre du faisceau.

L'emploi de matériaux supraconducteurs a un triple avantage :

l'absence de résistivité des supraconducteurs, qui évite toute dissipation d'énergie, permet de **gagner en puissance sans augmenter la consommation** de l'installation ;

grâce à l'annulation de l'effet joule (échauffement dû à la résistivité du matériau), il devient possible de faire passer de grandes densités de courant dans des bobinages très compacts. L'avantage est double puisque cela permet de **réduire la taille mais aussi le coût de l'installation sans déperdition de puissance** ;

A titre d'exemple, si le Large Hadron Collider (LHC) du Cern utilisait des aimants conventionnels en cuivre, l'anneau de l'accélérateur serait 4 fois plus grand, avec une circonférence de 120 km contre 27 km en réalité. Pour assurer la même énergie de collision, il consommerait 40 fois plus d'électricité, soit 1 Gigawatt.

la supraconductivité permet de **générer des champs magnétiques très puissants**, pouvant atteindre jusqu'à 20 Teslas.

La Plateforme Supratech (CEA/CNRS) : conception et élaboration des cavités accélératrices supraconductrices

Implantée sur le site de Saclay, Supratech est une plate-forme de recherche technologique régionale créée conjointement par le CNRS et le CEA en septembre 2008. Sa mission est de concevoir et de tester les cavités radiofréquence qui équipent les grands accélérateurs de particules. Elle effectue ainsi actuellement les tests cryogéniques et radiofréquence (RF) des douze cavités accélératrices et cryostats associés du futur accélérateur SPIRAL^{2,3}, projet d'extension du Grand accélérateur national d'ions lourds, le GANIL (CNRS/CEA), à Caen.



Cavité accélératrice supraconductrice en niobium. ©CEA/Irfu

³ Système de production d'Ions Radioactifs en Ligne de 2^{ème} génération : <http://www.ganil-spiral2.eu/spiral2/actualites>

Les cavités accélératrices sont des résonateurs qui permettent de stocker et d'amplifier le champ électrique destiné à accélérer un faisceau de particules chargées dans un accélérateur. Classiquement, ces cavités étaient faites en cuivre, un métal qui possède de bonnes propriétés électriques et thermiques. Mais à cause de l'effet Joule, il était impossible d'obtenir de forts champs électriques en continu, et une bonne partie du cycle utile était utilisée pour le refroidissement. L'introduction d'un matériau supraconducteur pour remplacer le cuivre a constitué une innovation importante qui a permis d'améliorer le rendement et le coût liés au fonctionnement des accélérateurs linéaires de particules. Les cavités supraconductrices offrent également une plus grande stabilité et flexibilité dans les opérations, ou encore des formes plus ouvertes qui facilitent l'alignement du faisceau, etc. Le matériau supraconducteur utilisé dans les cavités accélératrices est le niobium, connu pour ses bonnes performances en radiofréquence (RF). Mais les physiciens espèrent un jour le remplacer par des supraconducteurs composites nano-structurés.

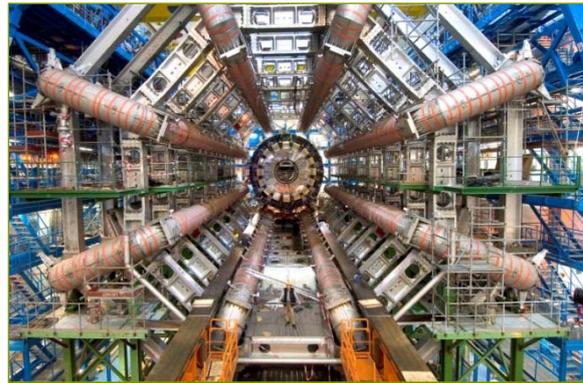
Améliorer les performances des cavités supraconductrices nécessite de mener des études sur le nettoyage et les traitements de surface, de mettre au point des techniques de préparation et d'assemblage en salle blanche⁴, afin d'éviter la contamination particulaire. La plate-forme Supratech met à la disposition des chercheurs tous les équipements technologiques nécessaires à la mise en œuvre de ces opérations ainsi qu'une zone de tests radiofréquence (RF).

Bien qu'il existe des cavités supraconductrices dans des accélérateurs circulaires (exemple : cavités accélératrices de Soleil), c'est dans les accélérateurs linéaires que cette technologie est la plus avantageuse car elle permet d'obtenir des champs accélérateurs beaucoup plus élevés que le cuivre pour une consommation électrique équivalente. Dans les accélérateurs circulaires, le champ accélérateur n'a pas besoin d'être très élevé. En revanche, pour pouvoir courber la trajectoire de faisceaux d'énergie très élevée, il faut des champs magnétiques très puissants. Pour générer de tels aimants, la supraconductivité joue également un rôle prépondérant.

⁴ Salle ultra propre (moins de 300 particules de poussières par m³) équipée d'un système de ventilation très sophistiqué qui évite la contamination des objets sur lesquels on travaille (Cavités).

La Route des Aimants Supraconducteurs (CEA-Irfu⁵)

Le hall 198 du CEA-Irfu effectue les tests d'aimants majeurs de Très grands instruments de recherche. A titre d'exemples, les détecteurs du CERN (CMS, Atlas...), les bobines de l'installation de fusion Tore Supra sont sortis de ses laboratoires. Il a également testé les bobines de W7X⁶. Dans les années à venir il testera les bobines de JT60 et il est aussi pressenti pour les essais des bobines du solénoïde central d'Iter. Les chercheurs étudient (magnétisme, électrotechnique, thermique et mécanique⁷), conçoivent, réalisent et testent certains des prototypes d'électroaimants supraconducteurs qui, à la pointe de la technologie, ne pourraient être réalisés par les industriels.



Aimant toroïdal du détecteur du LHC, Atlas, composé de huit bobines supraconductrices positionnées en étoiles. ©CEA/Cern

C'est ainsi au CEA-Irfu que les électroaimants du **futur système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) de 11,7 teslas** pour l'homme, baptisé Iseult, sont conçus et testés, en partenariat avec Siemens. Au centre de ce dispositif unique au monde, qui sera installé au centre de neuro-imagerie de Neurospin : un aimant composé de 65 tonnes de bobinages qui doivent être positionnés le plus précisément possible autour du cerveau. Le bobinage est réalisé à partir de plusieurs milliers de kilomètres de fils constitués d'un matériau supraconducteur en niobium-titane (NbTi) de l'ordre d'un millimètre de diamètre. Une fois refroidi et maintenu à très basse température (1,8 K soit - 271°C) grâce à de l'hélium superfluide, ce matériau se comporte comme un parfait conducteur du courant : il n'y a aucune perte d'énergie. Cette propriété, due au phénomène de supraconductivité, donne ainsi la possibilité de faire passer dans ces fils de niobium-titane **400 fois plus de courant électrique** que dans des fils classiques de même taille mais composés uniquement de cuivre. Ce système IRM à ultra haut-champ de 11,7 T promet d'atteindre une qualité d'image unique, offrant la possibilité de mieux décrypter les mystères du cerveau humain sain ou malade.

Par définition, un **électroaimant** est une bobine ou un ensemble de bobines qui développe un champ magnétique quand celles-ci sont alimentées en courant continu. Le champ magnétique ainsi obtenu est lié à la forme du bobinage, au nombre de spires et au courant qui les parcourt. En utilisant les propriétés de la supraconductivité, l'effet Joule, qui veut qu'un conducteur électrique chauffe à cause de sa résistance, n'existe plus. Cela offre la possibilité de réaliser des électroaimants très compacts

⁵Service des accélérateurs, de la cryogénie et du magnétisme (SACM)

⁶Le projet W7-X est un projet de l'Institut de physique du plasma de Garching (Allemagne) qui a la responsabilité de la réalisation d'une des machines de recherche du programme européen de fusion thermonucléaire par confinement magnétique. Cette machine, appelée stellarator Wendelstein 7-X, a un diamètre de l'ordre de 15 mètres pour une masse de 550 tonnes et est constituée de 70 aimants supraconducteurs destinés au confinement du plasma.

⁷Les courants de plusieurs dizaines de milliers d'ampères génèrent des forces magnétiques considérables (Forces de Laplace), il faut donc concevoir des structures capables de résister mécaniquement aux déformations induites par ces forces.

donnant des champs magnétiques très élevés dans des câbles de faible section. Du fait qu'il n'y ait plus de perte d'énergie, la consommation électrique liée au refroidissement des électroaimants supraconducteurs devient prépondérante devant leur alimentation en courant.

En plus de ces activités, le CEA-Irfu développe, en amont, une R&D sur le domaine et les applications des câbles supraconducteurs, sur de nouveaux types d'isolation, et en cryogénie, sur les écoulements de fluide et les échanges thermiques à très basses températures.

La supraconductivité au service de la fusion

Utiliser la fusion nucléaire à des fins de production d'électricité suppose de pouvoir faire fonctionner le réacteur de fusion en continu – ou du moins sur de longues durées. Pour maintenir le champ magnétique qui confine le plasma, un réacteur de fusion équipé de bobines de cuivre classiques doit consommer beaucoup d'énergie. Dans la perspective d'une mise en œuvre industrielle de la fusion, de fortes consommations d'énergie sont inacceptables car ils compromettent le bilan énergétique global de l'installation. La solution : avoir recours à des bobines supraconductrices, qui n'offrent quasiment aucune résistance au courant électrique.

Le hall 198 rassemble 4 stations d'essais d'aimants supraconducteurs :

- **SCHEMA**, la Station Cryogénique Horizontale d'Essais Magnétiques, permet de tester différents types d'aimants terminés à fort courant : à 4,2 ou 1,8°C du zéro absolu et 20 000 ampères⁸, avec 160 points de mesures enregistrés toutes les 50 microsecondes.
- La **Station Verticale**, au contraire, permet de tester des composants d'aimant avant leur assemblage final. Cette station fonctionne en bain à 4,2 K (-268,95°C) et 20 000 ampères.
- La **Station d'Essais Huit Teslas** est elle-même composée d'un très gros aimant supraconducteur de 8 teslas, avec une grande ouverture centrale dans laquelle on peut glisser les éléments à tester. Elle permet de tester les composants d'aimants développés au cours d'activités telle que celles du programme Iseult, ou celles de R&D en fort champ magnétique.
- La **Station W7X** comporte deux grands cryostats de 180 m³ dans lesquels ont été successivement testées et qualifiées les 70 bobines supraconductrices qui composeront le stellerateur W7X⁹ à Greifswald en Allemagne. Cette station travaille à 4,2 K et peut alimenter les aimants en courant jusqu'à 25 000 ampères. Cette station se prépare à tester l'aimant R3B¹⁰.

⁸Alimentation qui équivaut à la consommation d'une petite ville

⁹Aimants pour la fusion

¹⁰ Aimant de détecteur pour la physique nucléaire au GSI en Allemagne

Quid du quench ?

Les supraconducteurs conventionnels fonctionnent dans un domaine très restreint en température, mais également dans une gamme limitée en champ magnétique et en densité de courant. Si un supraconducteur sort de son champ de fonctionnement, un *quench* peut se produire : le supraconducteur devient brutalement résistif. Il faut alors immédiatement le déconnecter de sa source d'énergie pour éviter qu'il se dégrade, et dans le cas des aimants, décharger au plus vite l'énergie qu'ils stockaient.

La conception d'aimants supraconducteurs suppose de trouver le dimensionnement optimal qui permettra d'éviter ce phénomène indésirable. Outre le champ magnétique, la température, la densité de courant et la taille de l'aimant, la conception doit également prendre en compte les contraintes mécaniques liées aux forces électromagnétiques et à la rétraction des matériaux à basse température. En outre, même si la conception vise à limiter au maximum le risque de quench, le phénomène ne peut être exclu. La protection de l'aimant consiste alors à mettre en place un système de détection rapide du quench et à favoriser la dissipation de l'énergie stockée au sein de l'aimant dans des résistances externes.

Dans une cavité accélératrice, le risque de quench existe également. S'il y a peu d'énergie stockée dans une cavité –et donc pas de risque mécanique ou de réchauffement brutal– la cavité en revanche cesse d'être « accordée », et l'onde radiofréquence ne peut plus y pénétrer : la cavité ne fonctionne plus. Ces pièces sont donc systématiquement testées avant d'être installées dans leurs cryostats. Les opérations de traitement de surface, effectuées sur les cavités avant d'être utilisées, sont également indispensables car ils permettent d'éliminer de petits défauts présents sur les cavités, qui pourraient conduire à un échauffement local du matériau et à un quench « thermique ».

Supraconductivité et santé : *IRM bas champ, magnétoencéphalographie (MEG) et magnétocardiographie (MCG) au Service de physique de l'état condensé (SPEC Unité de Recherche Associée CEA-Iramis/CNRS)*

S'il est un domaine dans lequel la supraconductivité a joué un rôle essentiel, c'est celui de l'imagerie médicale. La technologie de l'IRM, outil de diagnostic et de recherche désormais incontournable, est en effet une retombée directe des recherches menées sur le sujet. Spécifiquement, la base d'une IRM est de créer un champ magnétique très fort et homogène sur un volume suffisant afin que les protons de l'eau du corps du sujet puissent tous « tourner sur eux-mêmes »¹¹, à la même fréquence. Il s'agit là d'une première difficulté technologique, résolue avec la supraconductivité qui permet de disposer de champs magnétiques intenses, stables et uniformes.

Outre l'IRM haut champ, la supraconductivité intervient dans la fabrication des capteurs magnétiques qui sont à la base d'autres techniques d'imagerie médicale : l'IRM bas champ, la magnétoencéphalographie (MEG) et la magnétocardiographie (MCG)

Les capteurs magnétiques de petite taille les plus sensibles que les médecins utilisent sont basés sur des boucles supraconductrices : les SQUIDs¹². Ces capteurs sont réalisés en Niobium ou en supraconducteur à haute température (YBaCuO)¹³. Récemment, les chercheurs du SPEC ont développé un nouveau type de capteur, appelé capteurs mixtes qui combinent des capteurs à magnétorésistance géante avec des boucles supraconductrices. Ces capteurs ont l'avantage de fonctionner avec des supraconducteurs à haute température critique (haut-Tc) et de présenter une robustesse aux perturbations extérieures bien supérieure au SQUIDs. Leur sensibilité est un peu moins bonne que les SQUIDs à basse fréquence, mais au dessus de 10kHz, ils sont actuellement les meilleurs capteurs magnétiques connus.

Les capteurs magnétiques :

Environ 4 milliards de capteurs magnétiques sont produits chaque année pour équiper de très nombreux objets technologiques. Par exemples, il y a entre 20 à 40 capteurs dans une voiture, 3 ou 4 dans un réfrigérateur, des capteurs dans les téléphones portables, les compteurs électriques. Ils sont utilisés parce qu'ils mesurent le champ magnétique créé par un courant ou par un aimant sans contact et donc sans usure ou sans danger. Il y a 20 ans, une nouvelle technologie de capteurs, dits à magnétorésistance géante est apparue (prix Nobel 2007, A. Fert et P. Grünberg). Ces capteurs, de taille micronique équipent tous les disques durs des ordinateurs.

¹¹ Dans ce cas précis, le terme scientifique qui convient est « précesser ».

¹² Les SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Device) sont constitués d'une boucle supraconductrice coupée par deux jonctions Josephson (rétrécissement ou barrière de taille nanométrique). Une tension apparaît aux bornes de la boucle lorsque celle-ci est soumise à un champ magnétique extérieur.

¹³ Pour les premiers, la détectivité atteinte est d'environ 1 femtoTesla (10^{-15} Tesla) et d'environ 30 femtoTeslas pour les seconds.

Ces capteurs ultrasensibles permettent de développer des systèmes d'imagerie magnétique autres que l'IRM classique : la magnétoencéphalographie (MEG) et la magnétocardiographie (MCG). Il y a peu de temps, les capteurs mixtes ont ouvert une autre possibilité, celle de réaliser de l'IRM (imagerie par résonance magnétique) à très bas champ.

La **MEG** est une technique passive permettant de mesurer l'activité neuronale en temps réel. Elle consiste à reconstruire une carte de l'activité électrique du cerveau en effectuant des mesures du champ magnétique créé par les courants dans les zones actives du cerveau, grâce à des centaines de capteurs magnétiques. Le principe est qu'une zone active correspond à une zone où des courants cohérents circulent. Ils créent un champ magnétique et si celui-ci est mesuré, il est possible par reconstruction inverse de déterminer la position spatiale de ceux-ci. La MEG est complémentaire de l'IRM fonctionnelle (IRMf) car elle offre une dimension temporelle de la mesure, avec une résolution de l'ordre de la milliseconde. Elle est malheureusement moins précise spatialement car elle ne fournit pas d'image anatomique en même temps. La magnétocardiographie (**MCG**) consiste de même à créer une image de l'activité électrique cardiaque au cours du temps. Elle est complémentaire de l'électrocardiogramme (ECG) car elle permet une reconstruction tridimensionnelle de ces courants.

L'**IRM à très bas champ**, très récente, est née d'une approche opposée à l'IRM conventionnelle. Lors d'une mesure d'IRM conventionnelle, la qualité de l'image dépend du rapport signal/bruit magnétique. On utilise donc un champ magnétique suffisamment fort, pour que le signal magnétique généré par le corps (qui s'accroît proportionnellement au champ magnétique environnant) soit largement au dessus du bruit. Dans l'IRM à très bas champ, la stratégie consiste, au contraire, à réduire le bruit du détecteur en utilisant des capteurs mixtes. En effet, pour un champ de 5 milliTeslas, ils ont un bruit qui est actuellement 10 à 20 fois plus faible qu'une très bonne bobine accordée et ils acceptent très bien les impulsions de radiofréquence. Il serait donc possible de développer des systèmes d'IRM très peu chers, transportables, non bruyants et acceptant des personnes avec des implants métalliques.

Grâce, d'une part, à la précision temporelle de la MEG et, d'autre part, à la localisation spatiale permise par l'IRM à très bas champ, les scientifiques du SPEC visent la fabrication d'une machine hybride combinant les deux techniques d'imagerie. Dans le cadre d'une initiative européenne, nommée **MEGMRI**, un premier prototype de machine, fonctionnant à 4K, et incluant à la fois des SQUIDS et des capteurs mixtes est en cours de montage. Il faudra attendre environ 3 à 5 ans pour obtenir une machine hybride, fonctionnant à 77K, et utilisant uniquement les capteurs magnétiques du SPEC.

ANNEXES

Pour aller plus loin...	p 19
Quelques utilisations des supraconducteurs	p 21
La supraconductivité et l'enseignement	p 22

Pour aller plus loin...

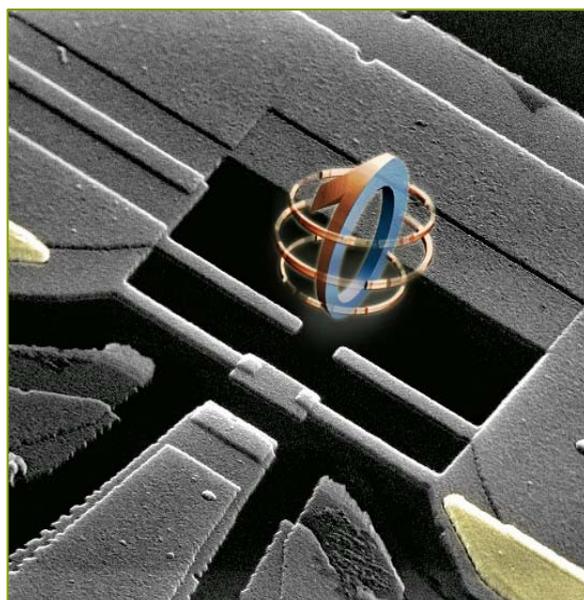
Deux autres activités du SPEC (Unité de Recherche Associée CEA/Iramis-CNRS) autour de la supraconductivité

De l'art de synthétiser les nouveaux supraconducteurs

Pour étudier les propriétés des supraconducteurs à haute température critique, la qualité des échantillons est une donnée essentielle. Seuls quelques laboratoires à travers le monde sont actuellement capables d'élaborer des échantillons de cuprates et de pnictures de fer de grande pureté. En France, c'est au Service de Physique de l'Etat Condensé (SPEC - Unité de Recherche Associée CEA/Iramis-CNRS), que ces échantillons sont synthétisés, caractérisés et que leurs propriétés physiques (magnétique et transport) sont étudiées. Les chercheurs ont développé différentes approches expérimentales pour sonder l'évolution de l'état électronique et magnétique des supraconducteurs. L'une consiste à introduire des défauts dans la structure, l'autre à doper le matériau soit par substitution chimique soit, dans le cas des cuprates, par contrôle de la teneur en oxygène excédentaire. Le SPEC collabore également avec le LPS-Orsay (CNRS-Université Paris-Sud 11), le synchrotron Soleil et le MPQ-Paris 7, s'appuyant sur différentes techniques expérimentales (RMN, Photoémission, diffusion Raman).

Demain l'ordinateur quantique ?

Les supraconducteurs conventionnels trouvent également leur application dans des recherches fondamentales sur des composants électroniques d'un nouveau type : **les circuits quantiques**. Une fois refroidis à très basse température (20 millièmes de degré au-dessus du zéro absolu), ces circuits se comportent comme de véritables atomes artificiels, offrant alors toute la richesse du monde quantique : ils peuvent notamment se trouver à la fois dans deux états électriques normalement incompatibles, de la même façon qu'un atome peut se trouver à la fois dans son état de repos (état d'énergie la plus basse) et dans un état excité (de plus grande énergie). Les physiciens qui travaillent sur les circuits quantiques



Première réalisation d'un bit quantique sur une puce électronique © CEA

souhaiteraient utiliser ces composants comme **bits quantiques**, c'est-à-dire comme des éléments « mémoire » d'une future machine quantique capable de traiter l'information bien plus efficacement que les ordinateurs classiques. Pour cela, les chercheurs doivent construire leurs circuits à partir de matériaux supraconducteurs, et ceci pour deux raisons. La première raison est caractérisée par le fait que les propriétés quantiques d'un objet sont si fragiles qu'elles tendent à disparaître très vite quand cet objet interagit avec le reste du monde (c'est pour cela que le monde à notre échelle ne nous paraît pas quantique du tout). Or le faible frottement des électrons circulant dans un métal non supraconducteur serait une interaction parasite suffisante pour réduire de manière catastrophique la « durée de vie quantique » de ces circuits. Pour cette raison, les circuits quantiques sont généralement fabriqués en niobium (température critique de 9 K, soit - 264°C) ou en aluminium (température critique de 1.3K, soit - 272°C) qui sont supraconducteurs. La seconde raison est qu'afin de se comporter comme de bons atomes artificiels, ces circuits doivent intégrer non seulement des condensateurs et des bobines (inductance), mais aussi un troisième type de dipôle électrique présentant une inductance variable en fonction du courant qui le traverse. Or un composant supraconducteur bien connu, la jonction Josephson¹⁴, offre précisément ces caractéristiques électriques. Les circuits quantiques supraconducteurs sont ainsi basés sur ces jonctions Josephson.

Le SPEC (URA CEA/Iramis-CNRS) tient une place de tout premier plan dans les recherches sur les circuits quantiques. Ses chercheurs ont réalisé en 2002 le premier bit quantique d'une durée de vie supérieure à la microseconde. Ils ont développé récemment un dispositif de lecture « haute-fidélité » de leur bit quantique, et ont aussi démontré le caractère véritablement quantique de leur circuit dans une expérience dite de « violation d'une inégalité de Bell ». Ils travaillent aujourd'hui à la réalisation d'une porte logique quantique d'une part, et essaye d'autre part de transférer de l'information quantique d'un circuit à bit quantique supraconducteur vers une mémoire quantique basée sur défauts électroniques au sein d'une matrice de diamant.

Ordinateur classique vs ordinateur quantique :

Dans un ordinateur classique, il existe des cases « mémoires » qui permettent de stocker des données : les bits. On y stocke l'information élémentaire sous la forme de 0 et de 1. Huit cases permettent de sauvegarder un caractère, un nombre plus important de cases permet quant à lui de stocker de l'image, du son ou de la vidéo. Pour un ordinateur quantique, on ne parle plus de bits mais de bits quantiques ou Qubits : des cases mémoires plus performantes du fait qu'elles obéissent aux lois de la physique quantique.

Ces lois autorisent notamment les registres de Qubits à contenir en même temps plusieurs données différentes, à la différence des registres classiques qui ne peuvent contenir qu'une seule donnée à la fois. De ce fait, un ordinateur quantique pourrait à chaque étape de son calcul traiter en une fois toutes les données contenues en même temps dans un de ses registres. Ce parallélisme massif du calculateur quantique ferait de ce dernier un outil extrêmement performant, notamment pour la résolution de problèmes complexes pour lesquels les ordinateurs classiques sont incapables de trouver une solution aujourd'hui.

¹⁴ Deux électrodes supraconductrices séparées par une couche ultra-mince de matériau isolant

Quelques utilisations des supraconducteurs

La compréhension et la maîtrise de la supraconductivité ont permis de développer de nombreuses applications, certaines sont déjà couramment utilisées, d'autres en cours de développement très prometteuses. Ces utilisations de la supraconductivité interviennent dans des domaines aussi variés que l'énergie, l'imagerie médicale, les télécommunications, l'électronique, l'informatique, la géophysique, et même l'archéologie.

Les supraconducteurs pour conduire et manipuler l'électricité

Pour faire des champs magnétiques élevés (pour les IRM, la RMN, ...)

Pour faire des câbles électriques

Pour le stockage d'énergie (les SMES)

Pour les limiteurs de courant (dans les centrales électriques)

Pour faire des moteurs plus compacts

Les supraconducteurs pour léviter et transporter

train supraconducteur de type maglev (les plus rapides au monde)

Les supraconducteurs pour détecter le magnétisme

Les SQUIDS : pour mesurer le magnétisme pour les physiciens, pour mesurer les champs magnétiques pour les géologues, pour des applications aussi en archéologie, pour les MEG (voir ci après)

Les supraconducteurs pour aider à soigner

Les bobines pour les IRM

L'imagerie SQUID pour la Magnétoencéphalographie

Les supraconducteurs pour l'électronique : les télécommunications et les ordinateurs de demain

filtres en électronique pour les stations-relais de téléphonie portable

Nouveaux composants en électronique

Ordinateurs quantiques Les supraconducteurs pour la physique de l'infiniment grand et l'infiniment petit

Pour les accélérateurs de particules : cavités et bobines

Pour la détection de particules dans l'espace et de matière noire : bolomètres et détecteurs

La supraconductivité et l'enseignement



©; S. Mangin, IJL / LPS (Univ. Paris-Sud / CNRS)

La supraconductivité est un des sujets enseignés à l'Université Paris-Sud 11, à l'UFR Sciences, notamment dans les cursus Master et Magistère¹⁵ de physique fondamentale d'Orsay, ou encore au cours de la seconde année de Master Concepts Fondamentaux de la Physique.

Les pôles universitaires et de recherche comme celui de Paris-Sud permettent ainsi aux enseignants-chercheurs de tirer directement profit de leurs recherches pour concevoir des enseignements originaux de qualité. Les enseignements délivrés sur la supraconductivité sont à la fois théoriques et expérimentaux. Les étudiants mènent par exemple des mesures proches de la recherche, comme des expériences de lévitation magnétique, de résistance électrique, ou encore de SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) sur un cuprate¹⁶ supraconducteur jusqu'à très basse température et dans des champs magnétiques élevés.

Les équipes scientifiques accueillent aussi les étudiants pour certains projets particuliers et des stages leur permettant ainsi d'accéder à la réalité de la recherche au sein des laboratoires de l'Université.

Une forte activité de vulgarisation vis à vis des lycées et du grand public de la région parisienne a également été développée par des enseignants-chercheurs autour de la supraconductivité et d'autres thèmes de recherche en physique (www.vulgarisation.fr)

Les laboratoires de recherche jouent donc un rôle majeur dans la formation délivrée au sein des pôles universitaires. Notamment au sein de l'Université Paris-Sud 11, où parmi ses 110 unités de recherche, onze laboratoires travaillent en lien avec la supraconductivité :

Laboratoire de physique des solides-LPS (CNRS / Univ. Paris-Sud 11) - www.lps.u-psud.fr - 01 44 32 34 19

Contacts : Julien Bobroff, Frédéric Bouquet, Claude Pasquier, Marc Gabay

Nouveaux supras, nanosupra, théorie, expériences

Institut d'électronique fondamentale-IEF (CNRS / Univ. Paris-Sud 11) www.ief.u-psud.fr - 01 69 15 76 12

Contacts : Daniel Bouchier, Dominique Debarre

¹⁵ Les cursus Magistère sont des formations universitaires de haut niveau qui s'articulent autour de la recherche, avec des stages en laboratoire en première et en troisième année de Magistère (Licence 3e année et Master 2e année) et autour du monde professionnel à travers des stages en entreprise dès la seconde année de Magistère.

¹⁶ Oxyde lamellaire composé de cuivre et d'oxygène.

nanosupra, bolomètres

Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse-CSNSM (CNRS / Univ. Paris-Sud 11) www.csnsm.in2p3.fr - 01 69 15 52 13

Contacts : Louis Dumoulin, Claire Kikuchi, Stephanos Marnieros

bolomètres, surfaces

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire-LAL & Institut de Physique Nucléaire-IPN (CNRS / Univ. Paris-Sud 11) *Plateforme Supratech*

www.lal.in2p3.fr - 01 64 46 83 00 / ipnweb.in2p3.fr - 01 69 15 73 40

Contact : Sébastien Bousson

accélérateurs, cavités

Institut d'astrophysique spatiale-IAS (CNRS / Univ. Paris-Sud 11) - www.ias.u-psud.fr

bolomètres

Laboratoire de Physique Théorique et Modèles Statistiques-LPTMS (CNRS / Univ. Paris-Sud 11)

www.lptms.u-psud.fr - 01 69 15 73 49

Contacts : Serguei Brazovski, Nicolas Pavloff, Marc Mezard

théorie

Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay-ICMMO (CNRS / Univ. Paris-Sud 11)

www.icmmo.u-psud.fr - 01.69.15.74.21

Contacts : Nita Dragoe, Alexandre Revcolevschi

chimie des matériaux

Département de mathématiques d'Orsay (CNRS / Univ. Paris-Sud 11)

www.math.u-psud.fr - 01 69 15 79 56

Contact : Bernard Heffner

théories mathématiques liées aux théories de la supra

Imagerie par Résonance Magnétique Médicale et Multi-Modalités-IR4M (CNRS / Univ. Paris-Sud 11)

www.ir4m.u-psud.fr - 01 69 15 79 65

Contacts : Luc Darasse, Jean-Christophe Ginefri

imagerie médicale IRM

Laboratoire de Génie Electrique de Paris-LGEP (CNRS / SUPELEC / Univ. Paris-Sud 11 / UPMC)

www.lgep.supelec.fr - 01 69 85 16 33