

## **ED SMAER**

### **Sujet de thèses 2013**

Laboratoire : Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux (UMR 8213)

Établissement de rattachement : ESPCI / UPMC / CNRS

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Stéphane Holé, 63ème section

Codirection et section CNU et CNRS : Jérôme Lesueur, 28ème section

Titre de la thèse : Imagerie par résonance magnétique nucléaire à bas champ avec des capteurs supraconducteurs intégrés à haute température critique

Collaborations dans le cadre de la thèse : Néant

Rattachement à un programme : Néant

Le sujet peut être publié sur le site web de l'ED SMAER : OUI / ~~NON~~ rayer la mention inutile.

#### **Résumé du sujet :**

Bien que souvent utilisée à haut champ magnétique, la résonance magnétique nucléaire à bas champ magnétique a de nombreux avantages, tant dans le domaine médical pour renforcer le contraste entre cellules bénignes et cellules malignes par exemple, que dans le domaine industriel pour limiter l'induction dans les matériaux métalliques par exemple. Les signaux sont cependant de très faible amplitude et l'utilisation de capteurs ultrasensibles tels que les SQUIDS sont nécessaires. Les SQUIDS (Superconducting QUantum Interference Device) sont les capteurs magnétiques les plus sensibles qui existent aujourd'hui. Basés sur la quantification de la phase dans un matériau supraconducteur, ils permettent de détecter des champs magnétiques infimes, de l'ordre du femtoTesla.

Le LPEM a développé une instrumentation originale pour l'imagerie par résonance magnétique nucléaire à bas champ magnétique utilisant un SQUID à basse température critique. Le passage à haute température critique, celle de l'azote liquide, soit 77.4 K, est d'un enjeu considérable pour les applications mais engendre des bruits de contact qu'il est difficile de maîtriser du fait de la nature cristalline des matériaux utilisés.

À travers ce sujet de thèse, le LPEM propose une nouvelle approche pour résoudre cette problématique internationale en utilisant les atouts des technologies qu'il a développées notamment en gravant sur une même couche supraconductrice tous les éléments requis afin de minimiser le nombre de contacts.

Le travail demandé comporte 4 phases : (1) conception et validation, (2) mise en œuvre électronique, (3) caractérisation et (4) exploitation de l'instrumentation réalisée. Le candidat doit présenter de bonnes connaissances en physique et en instrumentation, notamment dans le domaine du magnétisme. Il doit par ailleurs avoir montré de réelles capacités de rigueur, d'initiative et d'autonomie lors de son stage de fin d'étude.

**Sujet développé** (à présenter en 2 ou 3 pages maximum,  
en précisant notamment le contexte, les objectifs, les résultats attendus)

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire a permis des progrès considérables dans le domaine de la biologie et de la médecine et commence à montrer ses formidables capacités pour des applications dans le domaine industriel. La résonance magnétique nucléaire est principalement utilisée à haut champ magnétique surtout pour des raisons de rapport signal sur bruit mais son utilisation à bas champ magnétique aurait aussi beaucoup d'avantages, tant dans le domaine médical pour renforcer le contraste entre cellules bénignes et cellules malignes par exemple, que dans le domaine industriel pour limiter l'induction dans les matériaux métalliques par exemple. Les signaux obtenus à bas champ sont cependant de très faible amplitude et le développement de nouvelles méthodes de mesure est nécessaire.

Le Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux (LPEM, UMR8213) situé à l'ESPCI vient d'entrer dans le cercle fermé du peu de laboratoires ayant mis au point une expérience de résonance magnétique nucléaire dans le champ terrestre, qui est d'environ 50  $\mu\text{T}$ , en utilisant un SQUID à basse température critique comme capteur de champ magnétique. Les SQUIDS (Superconducting QUantum Interference Device) sont les capteurs magnétiques les plus sensibles qui existent aujourd'hui. Basés sur la quantification de la phase dans un matériau supraconducteur, ils permettent de détecter des champs magnétiques infimes, de l'ordre du femtotesla. L'expérience réalisée au LPEM se distingue de la concurrence mondiale par les interrupteurs supraconducteurs permettant de protéger le SQUID pendant la phase de polarisation magnétique de l'échantillon testé et par la forme des convertisseurs de flux utilisés pour exciter le SQUID pendant la phase de relaxation de la résonance magnétique nucléaire de l'échantillon. Cela a permis de travailler dans un environnement entièrement ouvert, c'est-à-dire sans aucun blindage magnétique, avec des technologies quasi planaires.

Le LPEM a par ailleurs développé des technologies de composants supraconducteurs à haute température critique tels que des SQUIDS ou des jonctions Josephson. Or un des freins majeur dans le développement de dispositifs d'imagerie par résonance magnétique nucléaire à bas champ magnétique est l'utilisation de matériaux supraconducteurs fonctionnant à la température de l'hélium liquide, soit 4.2 K. L'utilisation de SQUIDS à haute température critique, refroidis seulement à la température de l'azote liquide (77.4 K) permettrait donc de pousser le développement de l'imagerie par résonance magnétique nucléaire à bas champ.

Travailler avec des matériaux supraconducteurs à haute température critique n'est cependant pas une idée neuve mais aucun laboratoire n'a jusqu'à présent réussi à obtenir un rapport signal sur bruit suffisant dans un champ magnétique de l'ordre du champ terrestre. La principale difficulté vient de la nature des matériaux supraconducteurs à haute température critique car leurs connexions introduisent des résistances de contact non négligeables qui sont d'importantes sources de bruits dans le signal.

À travers ce sujet de thèse, le LPEM propose une nouvelle approche pour palier toutes les contraintes liées aux matériaux supraconducteurs à haute température critique en utilisant les atouts des technologies des composants supraconducteurs et des convertisseurs de flux qu'il a développées. Cette nouvelle approche consiste à réaliser sur une même couche supraconductrice plane tous les éléments supraconducteurs. Cela permet de réduire considérablement le nombre de contacts ainsi que l'encombrement du dispositif qui peut alors être utilisé pour un plus grand nombre d'applications. Par ailleurs l'utilisation de couches supraconductrices de relativement grande taille rend possible la réalisation de réseaux de

capteurs et donc la combinaison de la résonance magnétique nucléaire avec la tomographie magnétique dans le but de maximiser la taille des échantillons qu'il est possible d'étudier.

Le travail demandé comporte plusieurs étapes d'étude et de réalisation.

La première étape est principalement une phase de conception. Elle consistera en l'étude précise de la forme et de la disposition des différents éléments supraconducteurs à graver sur un substrat pour former les principaux éléments du dispositif, par exemple des convertisseurs de flux, des interrupteurs, des SQUIDs, des jonctions Josephson, ... Des simulations numériques seront notamment réalisées puis validées par des réalisations. Plusieurs configurations pourront être prises en compte, notamment des configurations centrées uniquement sur la résonance magnétique nucléaire et des configurations en réseau pour allier résonance magnétique nucléaire et tomographie magnétique.

La seconde étape est une phase de mise en œuvre électronique. L'électronique de mesure et d'asservissement des SQUIDs ainsi que celle du pilotage des interrupteurs supraconducteurs seront étudiées et réalisées à partir de dispositifs existants. Les SQUIDs étant des capteurs mesurant le champ magnétique par l'intermédiaire de la différence de phase entre deux fonctions d'onde, le signal qu'ils produisent est donné à un modulo près. L'objectif de l'électronique de mesure et d'asservissement est donc primordial pour étendre et linéariser la plage de mesure. L'objectif de l'électronique de pilotage des interrupteurs supraconducteurs est de contrôler finement les cycles de mesure et ainsi de reconstruire dans les meilleures conditions les images par résonance magnétique nucléaire et/ou par tomographie magnétique.

La troisième étape est une phase de caractérisation. L'ensemble des dispositifs supraconducteurs réalisés seront insérés et testés dans un cryostat à la température de l'azote liquide, soit 77.4 K. Le cryostat qui sera utilisé a été spécialement conçu pour la résonance magnétique nucléaire à bas champ magnétique. Il comporte notamment une paroi d'épaisseur réglable pour permettre la mesure d'échantillon à l'extérieur du cryostat, c'est-à-dire à température ambiante. Les cycles de polarisation magnétique et de relaxation de la résonance magnétique nucléaire de l'échantillon pourront alors être validés. L'obtention d'un signal de résonance magnétique nucléaire dans un champ magnétique voisin de celui du champ magnétique terrestre sera un premier aboutissement du travail de thèse proposé.

La quatrième étape est une phase d'exploitation de l'instrumentation réalisée. Son objectif est de faire un ensemble de mesures dans des champs magnétiques faibles mais contrôlés afin de reconstruire l'image d'échantillons par résonance magnétique nucléaire. Cela sera un second aboutissement du travail de thèse proposé. Selon le temps restant, les réseaux de capteurs seront testés afin de reconstruire des images d'échantillons de relativement grande taille en utilisant la résonance magnétique nucléaire et les techniques de la tomographie magnétique. Cette approche innovante constituera un aboutissement supplémentaire

Pour effectuer ce travail, nous recherchons un candidat qui soit attiré par l'instrumentation et la physique expérimentale et notamment par le magnétisme, la résonance magnétique nucléaire, la supraconductivité, l'électronique et l'imagerie médicale. Le candidat, de par son cursus d'études supérieures, doit avoir de bonnes connaissances en physique ou en instrumentation, notamment dans le domaine du magnétisme, et quelques connaissances d'électronique. Il doit par ailleurs avoir montré de réelles capacités de rigueur, d'initiative et d'autonomie lors de son stage de fin d'étude, qualités qui devront être attestées par une lettre de recommandation de la part de son responsable de stage.