

## Proposition de thèse 2019

### Front-end supraconducteur à base de MgB2 fonctionnant entre 10K et 20K

Le traitement tout numérique du signal hyperfréquence est une voie prometteuse pour réaliser à terme des équipements sol et des charges utiles flexibles pour les radiocommunications spatiales et la radioastronomie. En radiocommunication, la surveillance du spectre très large bande et les télécommunications spatiales sont des applications possibles, et ceci d'autant plus avantageusement que d'autres parties du satellite nécessitent un cryorefroidissement. Les progrès réguliers des composants de traitement numérique devraient permettre d'envisager à terme de disposer d'une puissance de calcul embarquée conforme aux besoins de ces charges utiles. Des technologies annexes comme les liaisons optiques numériques capables d'assurer les échanges de données entre les équipements de traitement sont en bonne voie pour être spatialisés.

L'électronique numérique supraconductrice RSFQ (Rapid Single-Flux Quantum) est une solution technologique qui permet d'envisager la numérisation des signaux RF directement sur la fréquence de la porteuse en faisant l'économie des convertisseurs de fréquence analogiques. La sensibilité élevée des circuits RSFQ permet également de supprimer les amplificateurs d'entrée faible bruit (LNA). Par ailleurs cette technologie est également une solution entrevue pour les super-calculateurs (projet américain C3 : Cryogenic Computer Complexity). Elle permet d'envisager le traitement intensif de données à puissance consommée négligeable directement à température cryogénique, par exemple comme back-end de récepteurs supraconducteurs comme pour l'interférométrie en radioastronomie, ou de télécommunications.

Dans ce contexte l'IMEP-LAHC développe des circuits de front-end RF RSFQ en partenariat avec le CNES et Thales-Alenia-Space, et des magnétomètres à SQUIDS numériques (porteuse du signal entre 0,01 et 100 Hz). Les deux dispositifs sont des convertisseurs analogiques-numériques (CAN) utilisés dans des modes de fonctionnement différents mais basés sur la même technologie de jonctions Josephson shuntées à base de niobium et refroidies à 4,2K. Le travail en cours consiste en particulier à miniaturiser la tête de réception pour évaluer le niveau d'intégration possible et les fonctionnalités ultimes de circuits plus compliqués et en terme de fréquence d'échantillonnage, à modifier la manière de polariser les circuits pour supprimer la puissance statique dissipée (technologies eRSFQ et eSFQ : energy-efficient SFQ) et à augmenter la dynamique des magnétomètres actuels. Ce travail se fait en collaboration avec des centres de technologie permettant de fabriquer les circuits : la fonderie FLUXONICS située à Iéna en Allemagne (front-end RF RSFQ), le centre de métrologie nationale italienne (INRIM) à Turin (technologie Focused Ion beam (FIB) eSFQ pour un CAN à fréquence d'échantillonnage plus élevée), fonderie japonaise CRAVITY de l'AIIST pour les magnétomètres numériques.

L'une des limitations des développements actuels pour certaines applications, notamment concernant la portabilité, la compacité des systèmes et la puissance totale requise pour les applications spatiales, est liée à la température de 4,2K qui est environ la moitié de la température critique du niobium qui est le supraconducteur basse  $T_c$  le plus couramment utilisé. A cette température il faut entre 1000 et 10000 watts pour obtenir 1 watt à 4,2K. Un passage à 10K ou 20K de température de fonctionnement permettrait d'améliorer le bilan thermique par un facteur important (études antérieures avec le matériau NbN ( $T_c \approx 16K$ ) ayant montré qu'à 9 K, le cryo-refroidissement nécessitait 2 étages au lieu de 3 pour 4K). Pour l'instant, les Etats-Unis et le Japon réinvestissent dans le matériau NbN qui présente en outre l'avantage de pouvoir compacter les circuits car l'inductance cinétique de films minces est plus élevée. En France et même en Europe l'environnement technologique actuel ne permet pas d'envisager à court terme de tels développements.

Par contre il est un matériau qui présente des propriétés particulièrement intéressantes pour nos applications numériques et qui n'a pas encore été beaucoup investigué : ce matériau est MgB2. A la différence des supraconducteurs à haute  $T_c$  la physique de ce matériau est bien comprise et sa fabrication est relativement aisée. Sa température critique de 39K permet d'envisager un fonctionnement à 20K avec des bons paramètres. Par ailleurs, peu de temps après sa découverte en 2001 [1], des jonctions Josephson et des SQUIDS ont été fabriqués la même année avec des propriétés attractives [2]. L'INRIM a également obtenu de très bonnes performances dès 2005 [3]. Les Etats-Unis ont fourni les premiers résultats avec l'objectif de réaliser des circuits RSFQ avec des jonctions MgB2 submicroniques en 2015 [4], mais aussi plus récemment des détecteurs [5-8] basés sur l'amélioration des propriétés des films de MgB2 développés en particulier au Jet Propulsion Laboratory (NASA) en Californie [9]. Pour les applications numériques il n'est pas souhaitable de travailler à trop haute température pour éviter des taux d'erreurs numériques trop élevés causés par le bruit thermique. MgB2 apparaît donc comme un matériau prometteur, également en terme de vitesse ultime de fonctionnement ( $RnI_c = 1,3$  mV correspondant à une fréquence d'horloge RSFQ de l'ordre de 200 GHz).

Dans le cadre de cette proposition de thèse l'objectif est donc de transposer le savoir-faire de l'IMEP-LAHC dans la technologie RSFQ et eSFQ pour fabriquer de petits circuits permettant d'évaluer les performances de MgB2. On s'attachera surtout, mais pas uniquement, à étudier l'influence de la température sur les paramètres et les performances en mode numérique. Une partie du travail consistera à fabriquer les circuits à l'INRIM à Turin avec qui l'IMEP-LAHC a l'habitude de travailler. L'INRIM est le centre européen ayant prouvé la fabrication de jonctions Josephson et de

SQUIDS à base de MgB2 [3]. Le doctorant devra donc passer une partie non négligeable de son temps à Turin (environ 50%). Il sera encadré partiellement par une collègue de l'INRIM. Le reste du travail de thèse consistera à concevoir les circuits et les mesurer à l'IMEP-LAHC.

Enfin, il est important de noter que ce matériau MgB2 est en développement au JPL (NASA) pour le développement de détecteurs, notamment pour des applications en astronomie. Il est important d'évaluer dans quelle mesure on peut envisager à terme d'intégrer des capteurs THz MgB2 et leur traitement numérique pour de futurs imageurs THz tout supra. Cette thèse est aussi un premier pas dans cette direction.

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akim-itsu, "Superconductivity at 39 K in MgB2," *Nature*, vol. 410, pp. 63–64, 2001.
- [2] A. Brinkman, D. Veldhuis, D. Mijatovic, G. Rijnders, D. H. A. Blank, H. Hilgenkamp, and H. Rogalla, "Superconducting quantum interference device based on MgB2 nanobridges," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, pp. 2420–2422, 2001.
- [3] C. Portesi, D. Mijatovic, D. Veldhuis, A. Brinkman, E. Monticone, and R. S. Gonnelli, "MgB2 magnetometer with a directly coupled pick-up loop," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 303–306, 2005.
- [4] T. Melbourne, D. Cunnane, E. Galan, X. X. Xi, and Ke Chen, "Study of MgB2 Josephson Junction Arrays and Sub- $\mu$ m Junctions," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25, No. 3, 1100604, June 2015.
- [5] A.E. Velasco, D.P. Cunnane, S. Frasca, T. Melbourne, N. Acharya, R. Briggs, ... & V.B. Verma, "High-operating-temperature superconducting nanowire single photon detectors based on magnesium diboride," In *CLEO: QELS Fundamental Science* (pp. FF1E-7). Optical Society of America, May 2017.
- [6] M.A. Wolak, N. Acharya, T. Tan, D. Cunnane, B.S. Karasik, & X. Xi, "Fabrication and characterization of ultrathin MgB2 films for hot-electron bolometer applications," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 25, No. 3, 2015
- [7] D. Cunnane, et al. "Low-noise THz MgB2 Josephson mixer," *Applied Physics Letters* 109.11 (2016): 112602.
- [8] D. Cunnane, et al. "Optimization of parameters of MgB2 hot-electron bolometers," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 27.4 (2017): 1-5.
- [9] Withanage, Wenura K., et al. "Growth of magnesium diboride thin films on boron buffered Si and silicon-on-insulator substrates by hybrid physical chemical vapor deposition." *Superconductor Science and Technology* 31.7 (2018): 075009.

## Informations pratiques sur la thèse

**Public visé :** Etudiants d'écoles d'ingénieurs et de master 2 de physique ou d'électronique.  
Bonne connaissance des techniques numériques et analogiques.  
Bonne maîtrise des pratiques expérimentales.  
Connaissances souhaitables des techniques de fabrication de composants en salle blanche  
Des connaissances des supraconducteurs et des techniques cryogéniques sont un plus.  
Mention assez bien (moyenne supérieure à 12/20) requise en master 1 et en master 2.

**Responsable CNES de la thèse :** Thierry Robert – DCT/RF/STR – courriel : [Thierry.Robert@cnes.fr](mailto:Thierry.Robert@cnes.fr)

**Encadrement de thèse :** Pascal Febvre, IMEP-LAHC, tél. 04-79-75-88-64, courriel : [Pascal.Febvre@univ-smb.fr](mailto:Pascal.Febvre@univ-smb.fr)  
Luc Lapiere, CNES, courriel : [Luc.Lapiere@cnes.fr](mailto:Luc.Lapiere@cnes.fr)

**Lieu de la thèse :** IMEP-LAHC – CNRS UMR5130  
Université Savoie Mont Blanc  
Campus scientifique  
73376 Le Bourget du Lac Cedex

**Période de la thèse :** démarrage au 1<sup>er</sup> octobre 2019