

Avis de Soutenance

Monsieur Thomas BRUN

Sciences de l'Univers

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés
MAROT: Un magnétomètre miniature pour l'exploration spatiale

Travaux dirigés par Monsieur Matthieu KRETZSCHMAR et Madame Hélène BEA
Ecole doctorale : Energie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers - EMSTU
Unité de recherche : LPC2E - Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace

Soutenance prévue le **mercredi 27 mai 2026** à 14h00

Lieu : CEA, 17 Av. des Martyrs, 38000 Grenoble

Salle : Amphithéâtre Dautreppe

Composition du jury proposé

M. Matthieu KRETZSCHMAR	Professeur des universités	Université d'Orléans	Directeur de thèse
Mme Hélène BEA	Maîtresse de conférences	Université Grenoble Alpes	Co-directrice de thèse
M. Daniel LACOUR	Directeur de recherche	CNRS	Rapporteur
M. Guillaume AGNUS	Professeur des universités	Université Paris Saclay	Rapporteur
M. Thierry DUDOK DE WIT	Professeur des universités	Université d'Orléans	Examinateur
Mme Laurence MÉCHIN	Directrice de recherche	CNRS	Examinatrice
Mme Myriam PANNETIER-LECOEUR	Directrice de recherche	CEA	Examinatrice
Mme Claire BARADUC	CEA	Invitée	
M. Guillaume JANNET	CNRS	Invité	

Mots-clés : Capteur, Microfabrication, Sensibilité, Bruit, Jonction Tunnel Magnétique, Concentrateurs de flux magnétique

Résumé :

Cette thèse porte sur la réalisation d'un magnétomètre dans le but de mesurer les fluctuations de champ magnétique dans les plasmas spatiaux du système solaire. Des magnétomètres de type Search-coil et Fluxgate sont couramment embarqués sur des satellites et produisent des mesures de haute qualité. De nos jours, la recherche utilise de plus en plus de petits satellites dont l'archétype est le « Cubsat » qui est un cube de 10 cm de côté. Cependant, l'instrumentation actuelle ne peut pas être miniaturisée sans compromettre les performances. C'est dans ce cadre que le projet MAROT propose l'élaboration d'un magnétomètre miniature utilisant comme élément sensible des jonctions tunnel magnétiques (MTJ), pour mesurer des champs de l'ordre du picotesla. Les jonctions tunnel magnétiques sont des éléments convertissant une variation d'aimantation en variation de résistance, permettant ainsi de mesurer les variations de champ magnétique. Ces magnétomètres sont déjà utilisés comme capteurs dans de nombreuses applications (automobile, imagerie médicale, capteurs dans des systèmes électroniques...) de par leur haute sensibilité au champ magnétique. Cependant, les MTJ souffrent d'une perte de détectivité à basse fréquence car leur bruit évolue inversement à la fréquence du signal mesuré. Or les basses fréquences (< 100 Hz) sont les fréquences pertinentes pour les plasmas spatiaux. Pour compenser cette limitation, le capteur MAROT contient des concentrateurs de flux (FC) pour amplifier le champ magnétique sur la jonction. L'optimisation du capteur passe d'une part par l'augmentation de sa sensibilité et d'autre part par la diminution du bruit, afin d'atteindre une détectivité de l'ordre du pT/VHz à 10 Hz. Les jonctions tunnels sont constituées d'un empilement constitué de plusieurs blocs : couche de référence, barrière tunnel, couche libre. Dans ma thèse, j'ai utilisé et réalisé des jonctions tunnels à réponse symétrique, présentant un état antiparallèle à champ nul, obtenu après un recuit sous champ. Cet état, ainsi que la configuration macrospin de la couche libre, minimisant l'hystérèse, est réalisée en piégeant légèrement la couche libre par une couche antiferromagnétique. Lors de cette thèse, tout d'abord, j'ai pu avoir accès à une couche libre à base de FeCoSiB, couche plus amorphe et plus douce que le NiFe précédemment utilisé, permettant une amélioration du rapport de magnétorésistance (TMR) d'un facteur supérieur à 2, jusqu'à 250%. Ces optimisations ont permis de gagner un facteur 3 dans la sensibilité des jonctions. Dans un second temps, j'ai réalisé des simulations de l'amplification du champ magnétique par les concentrateurs de flux (gain) en fonction des dimensions et caractéristiques de l'entrefer. Cette étude m'a permis de dessiner un nouveau design de capteur dans lequel des jonctions en série-parallèle sont ajoutées dans l'entrefer afin d'augmenter le volume magnétique, pour réduire le bruit, tout en maintenant un gain suffisant. Des capteurs avec ce design ont été fabriqués. Les premières mesures indiquent des sensibilités très grandes, de l'ordre de 2000 %/mT. Les mesures de bruit sont en cours, et semblent indiquer que les FC, à base de NiFe déposés par

électrolyse, apportent du bruit supplémentaire. La composition de ces FC sera donc à optimiser afin d'améliorer la détectivité, actuellement autour de quelques centaines de pT/VHz à 10 Hz. Pour finir, j'ai commencé à développer une méthode de hachage de champ magnétique pour réduire le bruit. Une couche magnétostrictive, déposée sur un substrat piézoélectrique soumis à une tension, peut voir sa direction d'anisotropie modifiée. Ce dispositif pourra être placé au-dessus de l'entrefer des FC et utilisé comme un interrupteur magnétique, qui alternativement modifie le flux magnétique sur les jonctions. Un gain d'un facteur au moins 10 sur la détectivité est attendu, ce qui permettra de s'approcher de l'objectif du pT/VHz à 10 Hz.

Summary:

This Ph.D. is about the elaboration of a magnetometer to measure fluctuations of the magnetic field in space plasma. Magnetometers, like the Search-Coils or the Fluxgates are already commonly used in satellites to measure magnetic field with great accuracy. Nowadays, the research field is looking at small satellites called Cubsats in order to reduce the cost of missions. However, the current magnetometers can not be miniaturized without compromising their performances. The MAROT project aims to solve this problem by developing a miniaturized magnetometer based on magnetic tunnel junction (MTJ) as its sensing element in order to measure magnetic field in the order of picotesla. Magnetic tunnel junctions are small devices that can convert a change in magnetization direction into a change of electrical resistance, thus allowing to measure variation of magnetic field. MTJs are already commonly used as sensors in the fields of automotive or medical imaging, because of their high field sensitivity. However, their performances are capped at low frequency because their noise is inversely proportional to the measured signal frequency, which happens to be the interesting frequency range for space plasma studies (< 100 Hz). To overcome this limitation, the MAROT sensor is equipped with magnetic flux concentrators (FC) in order to amplify the field on the MTJs. Optimising the sensor involves, on the one hand, increasing its sensitivity and, on the other, reducing its noise, in order to achieve the objective of a detectivity of the order of pT/VHz at 10 Hz. Magnetic tunnel junctions consist of a stack of several layers: a reference layer, a tunnel barrier, and a free layer. In my Ph.D., I used and fabricated symmetric-response tunnel junctions exhibiting an antiparallel state at zero field, achieved following field annealing. This state, along with the macrospin configuration of the free layer, which minimizes hysteresis, is achieved by slightly pinning the free layer with an antiferromagnetic layer. During this Ph.D., I was able to work with a magnetic stack using FeCoSiB as the free layer, this layer is amorphous and softer than the NiFe used previously. This change of materials allowed an increase of the magnetoresistance ratio (TMR) by a factor of 2, reaching up to 250%. These optimizations resulted in a sensitivity increase by a factor of 3. I then carried out simulations of the amplification of the magnetic field by flux concentrators (gain) as a function of the dimensions and characteristics of the air gap. This study enabled me to develop a new sensor design in which series-parallel junctions are inserted in the air gap to increase the magnetic volume, thereby reducing noise whilst maintaining sufficient gain. Sensors featuring this design have been manufactured. Initial measurements indicate very high sensitivities of around 2000 %/mT. Noise measurements are currently underway and appear to suggest that the NiFe-based FCs deposited by electrolysis introduce additional noise. The composition of these FCs will therefore need to be further optimized to improve detectivity, which currently stands at around a few hundred pT/VHz at 10 Hz. Finally, I have started to develop a magnetic field chopping method to reduce noise. A magnetostrictive layer, deposited on a piezoelectric substrate subjected to a voltage, can have its direction of anisotropy rotated. This device could be placed above the FC air gap and used as a magnetic switch, which alternately modifies the magnetic flux at the junctions. A gain of at least a factor of 10 in detectivity is expected, which will bring us closer to the target of pT/VHz at 10 Hz.