

# Sujets de Master 2016



- [1] Capteur magnétique ultra sensible pour application spatiale
- [2] Oscillateurs à transfert de spin pour les boucles à verrouillage de phase
- [3] Communication sans fils spintroniques
- [4] Mesure du couplage dynamique par un pur courant de spin
- [5] Test et caractérisation de circuit intégré numérique non-volatile
- [6] Ecriture de cellule mémoire magnétique (MRAM) par courant polarisé en spin assisté thermiquement
- [7] Theory of Spin Transport phenomena in Magnetic Tunnel Junctions
- [8] Modélisation des dispositifs pour l'électronique de spin: dynamique de paroi de domaine magnétique dans des nanofils à section circulaire
- [9] Etude de skyrmions dans des films magnétiques ultraminces

## Capteur magnétique ultra sensible pour application spatiale

Contact : Claire BARADUC DSM/INAC/SPINTEC [claire.baraduc@cea.fr](mailto:claire.baraduc@cea.fr) 0438784235

### Résumé :

Les capteurs magnétiques utilisés actuellement lors de missions spatiales sont des capteurs inductifs dont la très haute sensibilité est cependant obtenue au prix d'un encombrement et d'une masse (150 g/axe) importants, augmentant d'autant le coût de sa mise en orbite. La recherche systématique de solutions pour les réduire a été menée depuis de nombreuses années, mais on atteint aujourd'hui une limite et aucun progrès significatif n'est plus envisageable sans un changement radical de technologie. L'utilisation de composants issus de l'électronique de spin permettrait de franchir un cap très important dans la réduction des dimensions et de la masse des capteurs magnétiques vectoriels, pour peu qu'ils atteignent la sensibilité souhaitée.

Notre objectif est de développer un capteur magnétique ultra-sensible qui combinera une architecture innovante et un élément magnétorésistif bas bruit dont le concept est issu d'une découverte faite au laboratoire.

Le travail expérimental consistera en la fabrication du dispositif par les techniques de microfabrication et par des mesures fines de bruit électrique ; la composition du dispositif sera optimisée en fonction des résultats obtenus.

### Sujet détaillé :

Les capteurs magnétiques utilisés actuellement lors de missions spatiales sont des capteurs inductifs dont la très haute sensibilité est cependant obtenue au prix d'un encombrement et d'une masse (150 g/axe) importants, augmentant d'autant le coût de sa mise en orbite. La recherche systématique de solutions pour les réduire a été menée depuis de nombreuses années, mais on atteint aujourd'hui une limite et aucun progrès significatif n'est plus envisageable sans un changement radical de technologie. L'utilisation de composants issus de l'électronique de spin permettrait de franchir un cap très important dans la réduction des dimensions et de la masse des capteurs magnétiques vectoriels, pour peu qu'ils atteignent la sensibilité souhaitée.

Notre objectif est de développer un capteur magnétique ultra-sensible qui combinera une architecture innovante et un élément magnétorésistif bas bruit dont le concept est issu d'une découverte faite au laboratoire.

Le travail expérimental consistera en la fabrication du dispositif par les techniques de microfabrication et par des mesures fines de bruit électrique ; la composition du dispositif sera optimisée en fonction des résultats obtenus.

Diminuer le bruit intrinsèque du capteur est le principal verrou technologique de ce projet. Pour atteindre de très faibles niveaux de bruit, principalement d'origine magnétique, nous nous appuyerons sur trois innovations clés :

- une polarisation du circuit magnétique par un champ magnétique alternatif à une fréquence où le bruit est minimum, c'est-à-dire au-delà de la région où il varie selon une loi en  $1/f$ . Ceci devrait permettre une diminution de plusieurs ordres de grandeur du bruit à basse fréquence.
- l'utilisation de matériaux magnétiques innovants pour le CM caractérisés par une grande linéarité, une très faible hystérésis et une structure en domaine maîtrisée : des multicouches magnétiques douces telle que des couches épaisses de NiFe feuilletées et des multicouches NiFe/Ru/NiFe à couplage antiferromagnétique; des films magnétiques épais (15  $\mu\text{m}$ ) à base d'amorphe de type MetGlas.
- Une géométrie de la JTM optimisée caractérisée par de grandes surfaces effectives ( $>1000 \mu\text{m}^2$ ) couplées à de fortes épaisseurs de couches magnétiques douces (100 nm) permettant de diminuer fortement le bruit  $1/f$  magnétique.
- L'utilisation de l'effet de transfert de spin pour diminuer le bruit d'origine magnétique en ajoutant une couche polarisante à la jonction tunnel, selon un brevet déposé par SPINTEC [1].

### Compétences requises :

physique du solide

Stage pouvant se poursuivre en thèse : Oui

## Oscillateurs à transfert de spin pour les boucles à verrouillage de phase

**Contact :** Ursula EBELS   DSM/INAC/SPINTEC   [ursula.ebels@cea.fr](mailto:ursula.ebels@cea.fr)   0438785344

### Résumé :

Un concept central de la spintronique est le transfert de spin qui permet de transférer un moment magnétique des électrons de conduction, polarisés en spin, à l'aimantation locale d'une couche fine ferromagnétique. Ce transfert de moment magnétique est à l'origine des oscillations d'aimantation haute fréquence (Gigahertz) induit par un courant qui traverse un dispositif magnéto-résistif. Ce concept ouvre des nouvelles possibilités pour le développement des applications microondes intégrés. SPINTEC étudie ces effets de transfert de spin d'un point de vue fondamental pour comprendre la dynamique d'aimantation non-linéaire mais aussi en contexte des applications potentielles. Notamment, ce concept peut être utilisé pour la génération des signaux microondes, qui sera l'objet de ce stage poursuivi par une thèse.

### Sujet détaillé :

La dynamique non-linéaire d'un oscillateur à transfert de spin et la génération d'un signal microonde a été beaucoup étudiée dans le passé par notre laboratoire et par d'autres groupes. Des bons résultats au niveau de puissance de sortie et pureté spectrale ont été obtenus pour des oscillateurs émettant dans une gamme de fréquence de 0.2-1GHz. Pour des gammes de fréquences plus élevées et d'intérêt pour les applications, (1-10 GHz) on se heurte encore à un bruit de phase trop élevé. Ceci empêche actuellement l'intégration d'un tel dispositif en une phase locked loop (PLL). Le but de ce travail de stage, poursuivi par une thèse, sera d'explorer différentes configurations des empilements magnétiques (aimantation planaire et/ou perpendiculaire pour la couche libre et/ou couche polarisante), menant à un signal de sortie plus stable. Le but ultime sera l'opération et la caractérisation d'une PLL à des fréquences élevées.

Dans un premier temps l'étudiant(e) évaluera par simulations numériques la réponse dynamique des différentes configurations des empilements magnétiques. Ensuite l'étudiant(e) développera les dispositifs spintroniques (dépôt matériaux magnétique et nanofabrication) et caractérisera les performances microondes des dispositifs développés. Les dispositifs à des performances adéquats seront utilisés pour les tests PLL. Ce travail s'effectuera en collaboration avec d'autres membres d'équipe composants RF de Spintec et en collaboration avec TU Dresde (tests PLL) ainsi qu'en collaboration (voir en cotutelle) avec un groupe du « International Iberian Nanotechnology » center à Portugal (dépôt matériaux et nanofabrication).

Contacte: Ursula Ebels ([ursula.ebels@cea.fr](mailto:ursula.ebels@cea.fr))

### Compétences requises :

Etudiant(e)s motive(s) avec bonne formation de la physique du solide et/ou des nanosciences, curieux pour explorer des nouveaux concepts et idées à l'interface de la physique (spintronique) et des applications (composants microondes).

**Stage pouvant se poursuivre en thèse :** Oui

## Communication sans fils spintroniques

**Contact :** Ursula EBELS DSM/INAC/SPINTEC [ursula.ebels@cea.fr](mailto:ursula.ebels@cea.fr) 0438785344

### Résumé :

Un concept central de la spintronique est le transfert de spin qui permet de transférer le moment angulaire de spin des électrons de conduction à l'aimantation locale d'une couche fine ferromagnétique. Ce transfert de moment angulaire peut être utilisé pour générer des oscillations d'aimantation haute fréquence (Gigahertz) à partir d'un courant DC traversant un dispositif magnéto-résistif. Ce concept ouvre de nouvelles possibilités pour le développement d'applications microondes intégrées. SPINTEC étudie ces effets de transfert de spin d'un point de vue fondamental pour comprendre la dynamique d'aimantation non-linéaire mais aussi sous l'angle d'applications potentielles. En particulier, ce concept peut être utilisé pour la génération de signaux microondes, mais aussi pour la détection de signaux microondes. La combinaison des deux permettra de réaliser un système de télécommunication, qui sera l'objet de ce stage poursuivi par une thèse.

### Sujet détaillé :

Dans le cadre du projet ERC MAGICAL (2015-2019), un concept de télécommunication sera exploré, basé sur l'émission d'une onde électromagnétique par des oscillateurs à transfert de spin et sa détection via un deuxième oscillateur à transfert de spin. Dans un premier temps l'étudiant(e) explorera les différents concepts existants pour la détection dans le contexte des applications visées et réalisera des simulations numériques pour identifier les configurations magnétiques les plus prometteuses. Ensuite l'étudiant(e) développera les dispositifs spintroniques (dépôt des matériaux magnétiques et nanofabrication) et étudiera la réponse dynamique des dispositifs développés. Ce travail s'effectuera en collaboration avec d'autres membres d'équipe composants RF de Spintec.

Contacte: Ursula Ebels ([ursula.ebels@cea.fr](mailto:ursula.ebels@cea.fr)) and Bernard Dieny ([bernard.dieny@cea.fr](mailto:bernard.dieny@cea.fr))

### Compétences requises :

Etudiant(e)s motive(s) avec bonne formation de la physique du solide et/ou des nanosciences, curieux pour explorer des nouveaux concepts et idées à l'interface de la physique (spintronique) et des applications (composants microondes).

**Stage pouvant se poursuivre en thèse :** Oui

## Mesure du couplage dynamique par un pur courant de spin

**Contact :** Olivier KLEIN DSM/INAC/SPINTEC [olivier.klein@cea.fr](mailto:olivier.klein@cea.fr) 0438785802

### Résumé :

Le but de ce stage sera d'étudier les courants de spins émis par un isolants magnétiques dans un métal normal.

### Sujet détaillé :

Un des champs potentiels des nano-objets magnétiques sont les technologies de la communication où le magnétisme est utilisé ici pour ses propriétés non-réciproques, sa grande accordabilité combinée à une très forte sélectivité. Les propriétés attendues dépendent grandement du choix du matériau. Jusqu'à présent les meilleurs résultats ont été obtenus avec le grenat d'yttrium (YIG) que l'on retrouve dans des composants hyper-fréquences haut de gamme. La France a dans ce domaine un savoir-faire unique dans la fabrication de film mince de YIG de très bonne qualité dynamique. Très récemment, les premiers dispositifs nano-métriques à base de YIG sont apparus ouvrant un très grand champ d'applications potentielles pour l'industrie de la communication. Nous proposons un stage sur l'étude des propriétés dynamiques de ces nano-objets. Le stagiaire disposera donc de micro-structure en YIG. Son but sera de mesurer le comportement dynamique de ces nano-objets lorsqu'ils sont insérés dans un dispositif électronique. En particulier on s'intéressera au pompage de spin s'écoulant dans un métal normal adjacent. Le but sera de comprendre les phénomènes physiques de base permettant de contrôler électroniquement la dynamique de ces nano-objets.

Contacts : Olivier Klein ([olivier.klein@cea.fr](mailto:olivier.klein@cea.fr)) et Ursula Ebels ([ursula.ebels@cea.fr](mailto:ursula.ebels@cea.fr))

### Compétences requises :

Cours de physique du solide.

**Stage pouvant se poursuivre en thèse :** Oui

## Test et caractérisation de circuit intégré numérique non-volatil

**Contact :** [Gregory DI PENDINA](mailto:Gregory.DIPENDINA@cea.fr) DSM/INAC/SPINTEC [GREGORY.DIPENDINA@cea.fr](mailto:GREGORY.DIPENDINA@cea.fr) 04 38 78 47 46

### Résumé :

Plusieurs versions d'un même circuit numérique a été conçu et fabriqué. L'objectif de ce stage est de prendre en main la fonctionnalité de ce circuit puis de le tester et de le caractériser.

### Sujet détaillé :

Dans le cadre d'une collaboration entre 2 laboratoires du CEA, à savoir le Laboratoire de Composants Mémoire du LETI et le laboratoire Spintec (unité mixte CEA/CNRS/Université de Grenoble), un circuit intégré hybride CMOS + MRAM (Magnetic Random Access Memory) a été conçu et fabriqué. La MRAM est une nouvelle technologie mémoire non-volatile, basée sur un dispositif appelé JTM (Jonction Tunnel Magnétique). L'objectif du stage est tout d'abord de prendre en main cette technologie non-volatile émergente, puis de tester et caractériser ce circuit, qui comporte d'une part des structures de test simples (de type cellule 1 transistor / 1 JTM), et plusieurs versions de filtre numérique d'autre part. Les compétences requises sont une bonne connaissance de la conception de circuits intégrés et quelques notions de programmation. En effet, les tests se feront à partir d'un testeur industriel piloté par une interface logicielle graphique.

Ce stage se voudrait déboucher vers une thèse dans les domaines de la conception de circuits intégrés non-volatils et de la simulation micromagnétique permettant d'anticiper et analyser le comportement des JTM selon plusieurs critères de fabrication.

### Compétences requises :

Conception de circuit intégré

Programmation

Test

**Stage pouvant se poursuivre en thèse :** Oui

## Ecriture de cellule mémoire magnétique (MRAM) par courant polarisé en spin assisté thermiquement

Contact : Ricardo SOUSA DSM/INAC/SPINTEC [ricardo.sousa@cea.fr](mailto:ricardo.sousa@cea.fr) 0438784895

### Résumé :

Les mémoires magnétiques MRAM associent la non-volatilité à une écriture de quelques nanosecondes. Les concepts MRAM les plus avancés utilisent des impulsions de courant pour réaliser la commutation entre deux états de résistance. Une approche brevetée d'écriture assistée thermiquement, permet la réalisation de cellules mémoire à plus grande stabilité. La stabilité de la cellule est temporairement réduite pendant l'écriture par le chauffage électrique produit par le courant d'écriture, ce qui permet l'obtention d'un meilleur rapport stabilité/consommation.

Le travail de stage consistera à caractériser et évaluer l'utilisation simultanée d'un courant polarisé en spin et d'un chauffage contrôlé pour orienter l'aimantation de la couche de stockage d'un élément mémoire MRAM. L'objectif est d'obtenir une variation thermique de l'anisotropie magnétique la plus abrupte possible vers la température d'écriture. En même temps, il faut assurer que lors de l'écriture, la configuration magnétique est stable pendant et après l'impulsion d'écriture pendant la phase de refroidissement du point mémoire. Le travail consistera dans l'identification des conditions évitant d'avoir des erreurs d'écriture pendant le refroidissement de la jonction. Cette analyse pourra être faite à l'aide de mesures électriques des dispositifs, et aussi par une modélisation macrospin prenant en compte les variations thermiques des paramètres matériaux. Ce stage pourra être poursuivi en thèse (CIFRE).

### Sujet détaillé :

Les mémoires magnétiques MRAM non-volatiles sont une technologie en développement à Spintec en partenariat avec la start-up Crocus Technology. Ce type de mémoire a comme caractéristique d'associer la non-volatilité à des commutations rapides de l'ordre de la ns. La commutation de la direction de l'aimantation de la couche de stockage résulte en une variation de résistance de la cellule qui peut être supérieure à 100%, à des densités de courant de 106A/cm<sup>2</sup> par effet de transfert de spin. Ceci permet d'écrire un bit '1' ou '0' en fonction de la polarité du courant appliqué. Une approche brevetée d'écriture assistée thermiquement, permet la réalisation de cellules mémoire à plus grande stabilité. La stabilité de la cellule est temporairement réduite lors de l'écriture par le chauffage électrique produit par le courant d'écriture, ce qui permet l'obtention d'un meilleur rapport stabilité/consommation.

Le travail de stage est de caractériser et évaluer l'utilisation simultanée d'un courant polarisé en spin et d'un chauffage contrôlé pour orienter l'aimantation de la couche de stockage d'un élément mémoire MRAM. La structure de l'élément mémoire, une jonction tunnel magnétique, peut être optimisée par le choix des matériaux magnétiques, et aussi par la conductivité des barrières tunnel utilisées. L'objectif est d'obtenir une variation thermique de l'anisotropie magnétique la plus abrupte possible vers la température d'écriture. Au même temps, il faut assurer que la configuration magnétique pendant l'écriture est stable pendant et après l'impulsion d'écriture. Le travail consistera dans l'identification des conditions évitant d'avoir des erreurs d'écriture pendant le refroidissement de la jonction. Cette analyse pourra être faite à l'aide de mesures électriques des dispositifs, et aussi par une modélisation macrospin prenant en compte les variations thermiques des paramètres matériaux. La caractérisation électrique se fera sur des testeurs automatiques existants à Spintec. Il s'agira aussi de créer des procédures de test, permettant l'observation des commutations de résistance. Ces mesures permettent ensuite de calculer la probabilité de retournement associée à une condition d'écriture.

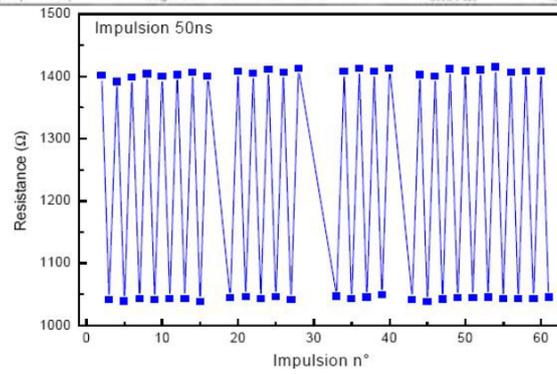
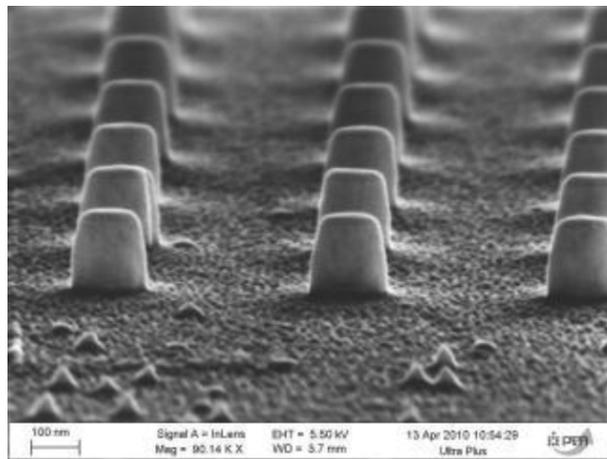
La mise en place des tests électriques sera réalisée en utilisant des programmes codés en MATLAB. Il est souhaitable que le(a) candidat(e) possède des connaissances élémentaires d'informatique et/ou instrumentation électrique. L'analyse des résultats nécessitera ensuite une compréhension des phénomènes physiques mis en jeu et une confrontation des résultats électriques avec les modèles.

Le stage sera réalisé en utilisant les moyens de test du laboratoire sur des échantillons réalisés par Spintec ou CROCUS Technology. Ce stage pourra être poursuivi en thèse (CIFRE)

Pour plus d'informations sur nos récents résultats :

[1] S. Bandiera, R.C. Sousa et al., Appl. Phys. Lett., 99, 202507 (2011)

[2] A. A. Timopheev, R. Sousa, M. Chshiev, L. D. Buda-Prejbeanu, and B. Dieny, Phys. Rev. B 92, 104430 (2015)



**Compétences requises :**

Connaissances élémentaires d'informatique et/ou instrumentation électrique

**Stage pouvant se poursuivre en thèse :** Oui

## Theory of Spin Transport phenomena in Magnetic Tunnel Junctions

**Contact :** Mairbek CHSHIEV   DSM/INAC/SPINTEC   [mair.chshiev@cea.fr](mailto:mair.chshiev@cea.fr)   04 38 78 02 80

### Résumé :

Magnetic tunnel junctions (MTJ) comprising two ferromagnetic (FM) layers separated by an insulator (I) play a crucial role in current and future developments of spin electronics (spintronics), such as such as magnetic random access memories (MRAM), hard disk drives, logic devices etc. This is due to observation in MTJs of high tunnel magnetoresistance (TMR) ratios, i.e. relative change of resistance when magnetic configuration is switched from parallel to antiparallel. The discovery of a new spintronic phenomenon called spin transfer torque (STT) makes possible controlling magnetic configuration of the tunnel junction by passing spin polarized current through it instead of applying magnetic field. It makes possible thereby creation of new generations of MRAM (STT-MRAM) where both read and write operations can be performed with spin polarised current.

### Sujet détaillé :

The purpose of this internship is to use a tight-binding method and non-equilibrium Green function technique in order to understand deeply the quantum nature of a wide range of spin polarized transport phenomena in magnetic tunnel junctions. Among phenomena to address the priority will be given not only to quantum description of tunnel magnetoresistance (TMR), but mostly to spin transfer torque (STT) since this phenomenon's behavior defines behavior of STT-MRAM and also is crucial for signal-to-noise ratio (SNR) of magnetic sensors since its contributes to noise. Namely, a physical nature of applied voltage dependences of TMR and STT will be investigated and understood what is extremely important in a view of aforementioned spintronic devices. We expect that these dependences will be very sensitive to electronic band structure of materials involved as well as to thicknesses of the metallic and insulating layers constituting the magnetic tunnel junctions. We will also address Spin Hall Effect and interfacial magnetic anisotropy behaviour in MgO-based tunnel junctions.

### Compétences requises :

solid background in condensed matter theory and computational methods

**Stage pouvant se poursuivre en thèse :** Oui

## Modélisation des dispositifs pour l'électronique de spin: dynamique de paroi de domaine magnétique dans des nanofils à section circulaire

Contact :Daria GUSAKOVA DSM/INAC/SPINTEC [daria.gusakova@cea.fr](mailto:daria.gusakova@cea.fr) 0438786568

### Résumé :

Le sujet de ce stage s'inscrit dans la continuité des études menées au laboratoire sur l'influence d'un courant polarisé en spin sur l'aimantation de structures magnétiques. Ce phénomène physique ouvre de nouveaux champs d'applications potentielles telles que les mémoires magnétiques MRAM, des processeurs à logique magnétique reprogrammable ou les dispositifs hyperfréquence pour la téléphonie mobile, GPS et les appareils sans fil. Le développement de dispositifs dans lesquels intervient l'action d'un courant polarisé en spin donne actuellement lieu à un soutien de modélisation important afin d'analyser les résultats expérimentaux et de prédire les nouvelles configurations fonctionnelles

### Sujet détaillé :

Les avancées récentes dans la fabrication des nanofils magnétiques à diamètre modulable [1,2] ont permis d'envisager de créer un nouveau type de mémoire magnétique de haut densité basé sur le réseau tridimensionnelle de fils auto organisé [Fig.1 (a)-(c)]. Du point de vue de la simulation numérique ce type de dispositif combine plusieurs particularités (forts gradients d'aimantation et de courants, géométrie courbée etc) qui exigent l'utilisation de modèles appropriés et de maillages non-réguliers [Fig.1(d)]. L'expérience antérieure de l'équipe dans le domaine a permis de mettre en œuvre conjointement entre Spintec et l'Institut Néel un nouveau code numérique éléments finis permettant d'intégrer simultanément les équations de transport polarisé en spin et les équations de micromagnétisme pour des maillages non-réguliers [3].

Dans le cadre de ce stage, le/la candidat/e va être amené/e à manipuler ce code afin de modéliser la dynamique de paroi de domaine magnétique sous l'action de courant polarisé en spin dans des nanofils à section circulaire modulable. Ce travail va permettre de définir les conditions de décrochage de la paroi, de définir les différents régimes dynamiques de propagation de la paroi (linéaire, oscillant [Fig.1(e)] ou turbulents) et de calculer les vitesses de propagation de la paroi. Ce stage permettra à l'étudiant/e de se sensibiliser aux concepts utilisés dans la théorie du transport dépendant de spin, à l'approche micromagnétique et à la modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis. De plus l'étudiant/e aura l'opportunité de se familiariser avec des logiciels scientifiques tels que Comsol, MatLab, Origin etc.

[1] H. F. Liew, S. C. Low, et W. S. Lew, J. Phys.: Conf. Series 266, 012058 (2011).

[2] S. Da Col, M. Darques, O. Fruchart, et L. Cagnon S. Da Col et al., Appl. Phys. Lett. 98, 112501 (2011).

[3] M. Sturma, J.-Ch. Toussaint, and D. Gusakova, J. Appl. Phys. 117, 243901 (2015).

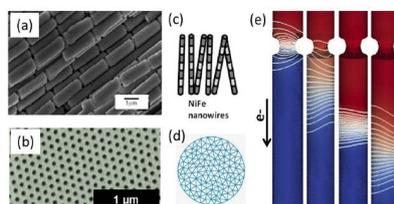


Figure 1 : (a)-(c) Nanofils magnétiques à section circulaire [1,2]. (d) Maillage non-régulier de méthode des éléments finis. (e) Déplacement de la paroi de domaine sous l'action de courant polarisé en spin dans un régime oscillant.

### Compétences requises :

connaissances solides en matière condensée

Stage pouvant se poursuivre en thèse : Oui

## Etude de skyrmions dans des films magnétiques ultraminces

Contact :Olivier BOULLE DSM/INAC/SPINTEC/ [olivier.boulle@cea.fr](mailto:olivier.boulle@cea.fr) 04 38 78 21 56

### Résumé :

La découverte récente de nouvelles structures magnétiques de tailles nanométriques, dénommées skyrmions magnétiques, suscite actuellement un intérêt considérable. Ces structures sont protégées topologiquement et faiblement sensibles aux défauts locaux dans le matériau. Leur stabilité, leur taille très petite (typiquement de l'ordre de la dizaine de nm) et le fait qu'elles peuvent être bougées par des courants de très faibles densités rendent ces structures très prometteuses comme porteuses d'information dans des technologies mémoires à très haute densité. Dans ce stage, nous proposons d'étudier la formation de skyrmions dans des multicouches magnétiques ultrafines déposées par pulvérisation cathodique de structure type métal lourd/métal ferromagnétique ultrafines telle que Pt/Co/AlOx, dont les propriétés magnétiques semblent être compatibles avec la formation de skyrmions magnétiques. Le stage s'appuiera sur l'ensemble des méthodes et techniques expérimentales utilisées pour la mise au point et la caractérisation de dispositifs spintronique : dépôt par pulvérisation cathodique, caractérisation magnétique, nanofabrication, caractérisation par magnéto-transport et par microscopie magnétique (MFM).

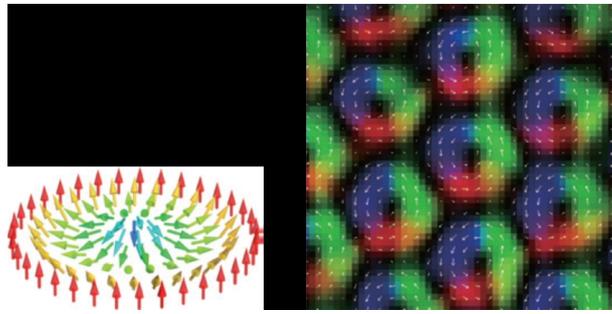
### Sujet détaillé :

La découverte récente de nouvelles structures magnétiques de tailles nanométriques, dénommées skyrmions magnétiques, suscite actuellement un intérêt considérable. Les skyrmions magnétiques sont des textures de l'aimantation qui ne peuvent être déformées de manière continue vers l'état ferromagnétique uniforme sans causer une singularité (Fig.1). Ils sont ainsi protégés topologiquement et faiblement sensibles aux défauts locaux dans le matériau. Leur stabilité, leur taille très petite (typiquement de l'ordre de la dizaine de nm) et le fait qu'ils peuvent être bougés par des courants de très faibles densités rendent ces structures très prometteuses comme porteurs d'information dans des technologies mémoires à très haute densité.

Les premières observations expérimentales de skyrmions magnétiques ont été effectuées dans des matériaux relativement épais (>15615 nm) dans lesquelles la structure cristalline est caractérisée par l'absence de symétrie d'inversion (Fig.2). Cela entraîne un terme supplémentaire dans l'interaction d'échange, dénommée interaction Dzyaloshinskii-Moriya (DM) qui tend à faire tourner l'aimantation autour d'un vecteur caractéristique  $\mathbf{D}$  et est à l'origine de la formation de skyrmions magnétiques. Ces skyrmions ne sont cependant observés que sous forme de réseaux organisés dans ces matériaux empêchant leur manipulation individuelle et sous certaines conditions de champ magnétique et de températures.

Récemment des premières observations de skyrmions magnétique isolés et leur manipulation par un courant ont été reportées dans des bicouches magnétiques ultrafines épitaxiées Ir/FePd en présence d'un champ magnétique et à basse température. Dans ce cas, l'interaction DM provient de la rupture de symétrie d'inversion liée à la présence de l'interface. Ces conditions expérimentales sont cependant peu compatibles avec des contraintes industrielles dans l'optique de dispositifs mémoires. Dans ce stage, nous proposons d'étudier la formation de skyrmions dans des multicouches ultrafines déposées par pulvérisation cathodique de structure type métal lourd/métal ferromagnétique ultrafines tel que Pt/Co/AlOx. Ces structures ont l'avantage d'être très versatiles, leurs propriétés magnétiques pouvant être modifiées en jouant sur la nature des matériaux, leurs épaisseurs, et les conditions de dépôts. Des mesures ont par ailleurs démontré que de fortes interactions DM dans ces matériaux. La méthode de dépôt par pulvérisation cathodique a par ailleurs l'avantage d'être pleinement compatibles avec des contraintes industrielles.

Le stage s'appuiera sur l'ensemble des méthodes et techniques expérimentales utilisés pour la mise au point et la caractérisation de dispositifs spintronique : dépôt par pulvérisation cathodique des multicouches ultra-fines et la caractérisation de leurs propriétés magnétiques par des méthodes de magnétométrie, puis nanofabrication de nanostructures découpées dans ces couches par lithographie électroniques et gravure ionique. La nanofabrication sera effectuée à la plateforme de nanofabrication PTA située dans le même bâtiment que le laboratoire Spintec. Les nanostructures seront ensuite caractérisées par des méthodes de magnéto-transport et par microscopie magnétique (MFM), afin de mettre en évidence la nucléation de skyrmions isolés et leur structure magnétique.



**Compétences requises :**

Master 2 en nanophysique, physique des matériaux, physique du solide

**Stage pouvant se poursuivre en thèse :** Oui