

## Contrat doctoral – ED Galilée

### **Titre du sujet : Effets du champ électrique et de la température sur l'interaction Dzyaloshinskii-Moriya d'interface et l'anisotropie magnétique**

- Unité de recherche : Laboratoire des sciences des procédés et des matériaux (LSPM)
- Discipline : Physique
- Direction de thèse : Belmeguenai Mohamed
  - Contact : belmeguenai.mohamed@univ-paris13.fr  
Tel: +33 (1) 49 40 34 81
- Domaine de recherche : Spintronique
- Mots clés : Interaction Dzyaloshinskii-Moriya d'interface, anisotropie magnétique perpendiculaire, effets d'interface, Dynamique rapide de l'aimantation, contrôle électrique, pompage de spin.

### Résumé

Aujourd'hui, l'électronique de spin est considérée comme la discipline qui propose des stratégies prometteuses pour résoudre quelques problématiques d'actualité notamment la réduction de la consommation électrique du secteur des technologies de l'information et de la communication ainsi que de garantir la continuité de l'augmentation insatiable de la densité de stockage de l'information. Dans ce cadre, le sujet de thèse se propose d'examiner l'évolution vers des dispositifs nanométriques dans la microélectronique et la spintronique, mettant en lumière l'importance de l'effet magnétoélectrique (ME) pour le contrôle de l'aimantation et les propriétés magnétiques d'interface tels que l'amortissement magnétique et l'interaction Dzyaloshinskii-Moriya par un champ électrique dans les systèmes incorporant une interface entre un métal lourd et un matériau ferromagnétique. L'effet de la température sur ces propriétés sera également étudié. Ceci ouvre la voie à des opportunités prometteuses pour des applications à température ambiante visant à développer de nouveaux dispositifs spintroniques plus rapides et économes en énergie.

### Contexte et état de l'art

La microélectronique et la spintronique connaissent aujourd'hui une évolution de plus en plus importante vers la réalisation de nouveaux dispositifs à l'échelle nanométrique dotés d'une fonctionnalité accrue. Dans le panorama des phénomènes permettant le contrôle des propriétés des matériaux à l'échelle nanométrique, l'effet magnétoélectrique (ME), lié au couplage entre le magnétisme et l'électricité dans la matière, occupe une place prépondérante dans la recherche mondiale [1-3]. Le contrôle de l'aimantation à l'aide d'un champ électrique fait actuellement l'objet d'un grand intérêt [4, 5] en raison de la consommation d'énergie ultra-faible qu'il devrait permettre et la possibilité d'un contrôle plus local de l'état magnétique, ce qui se traduit par une meilleure miniaturisation des dispositifs spintroniques. De nombreux progrès ont été réalisés dans un certain nombre de systèmes de matériaux différents, tels que les semiconducteurs magnétiques, les

métaux ferromagnétiques (FM), et les matériaux multiferroïques. Parmi ceux-ci, une grande partie des efforts a été concentrée sur les matériaux multiferroïques combinant les propriétés FM et ferroélectriques (FE), dans le but de contrôler le magnétisme par un champ électrique. Le couplage magnétoélectrique est relativement faible pour les matériaux multiferroïques monophasés, qui fonctionnent généralement à basse température, tandis que les composites magnétoélectriques multiferroïques, en particulier les hétérostructures multiferroïques, présentent suffisamment de choix suffisants pour obtenir un coefficient magnétoélectrique important à température ambiante et sont plus prometteurs pour les applications.

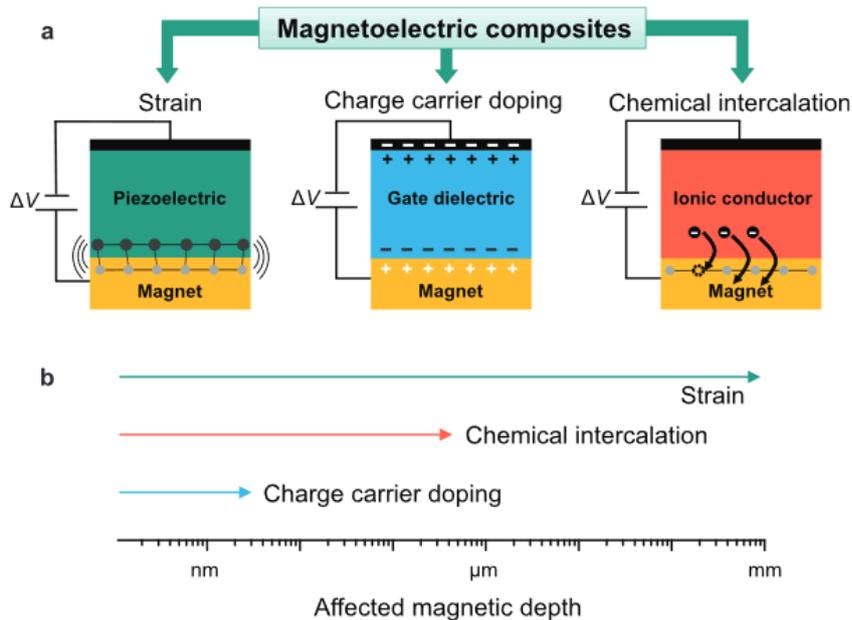


Figure : Mécanismes physiques pour initier l'effet ME dans les hétérostructures multiferroïques artificielles. b) Echelle de longueurs typiques des portées de l'effet ME affectées dans un matériau magnétique via une déformation sous tension, modulation des porteurs de charge et l'effet magnéto-ionique [5].

ismes ont été proposés pour initier le contrôle des propriétés magnétiques par le champ électrique (voir figure) dans les hétérostructures multiferroïques artificielles. Le premier repose sur la modulation de la densité des porteurs de charges aux interfaces via le champ électrique. En effet, les propriétés magnétiques des hétérostructures sont intimement liées à la densité des porteurs et par conséquent les changements dans le niveau de dopage des porteurs affectent de manière significative leurs propriétés magnétiques. Le deuxième concerne l'injection/le retrait d'ions dans le FM à l'aide d'un conducteur ionique, à l'instar des processus de charge/décharge qui se produisent dans les batteries électrochimiques. Le dernier est le couplage magnétoélectrique initié par des contraintes induites par un matériau piézoélectrique pour modifier l'état de déformation d'un matériau magnétique et, à son tour, son état magnétique via la magnétostriction. De plus, la température affecte remarquablement les propriétés magnétiques de différents matériaux et en particulier quand ils sont en couche ultra minces. En effet, la variation de la température du système pourrait provoquer la redistribution des charges entre les orbitales dans le plan et hors du plan conduisant ainsi à la dépendance en température de l'aimantation à saturation, des différents

E  
n  
général,  
trois  
mécan

types de l'interaction d'échange, de l'anisotropie et d'autres paramètres magnétiques. La dépendance en température des propriétés magnétiques fournit un moyen efficace pour étudier leurs relations et pourrait être utilisée pour mieux comprendre leurs origines physiques.

D'autre part, l'interaction spin-orbite, qui lie le mouvement orbital des électrons à leur spin, est associée à un certain nombre de phénomènes importants en magnétisme. En effet, récemment, on a découvert que l'interface FM/métal lourd (HM) abrite un large éventail de phénomènes très importants liés au couplage spin-orbite, tels que le couple spin-orbite, anisotropie magnétique perpendiculaire (PMA), l'amortissement induit par pompage de spin, l'interaction interrassiale Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) et l'effet Hall de spin. Ces phénomènes devraient jouer un rôle important dans le développement d'une nouvelle génération de dispositifs spintroniques qui devraient être plus rapides, plus denses, plus efficaces et fonctionner avec une consommation d'énergie réduite ainsi que dans la détermination de la viabilité de ces technologies. L'amortissement magnétique, caractérisé par le paramètre  $\alpha$ , généralement appelé constante d'amortissement, l'anisotropie magnétique perpendiculaire et la DMI sont des paramètres clés pour la fonctionnalité de ces dispositifs spintroniques. En effet, l'amortissement contrôle la dynamique de l'aimantation, détermine le seuil du courant de commutation des dispositifs basés sur le couple de transfert de spin [6], les vitesses des skyrmions et affecte fortement la direction de son mouvement [7]. Il affecte également l'efficacité des dispositifs magnoniques puisqu'il est corrélé à la longueur de diffusion des ondes de spin [8]. Sa valeur doit être choisie en fonction de l'application souhaitée. De plus, l'anisotropie magnétique perpendiculaire (PMA) est l'une des propriétés les plus importantes des matériaux magnétiques, non seulement d'un point de vue fondamental mais aussi en raison de ses applications potentielles, notamment dans le stockage magnétique de l'information, les mémoires magnétiques et les capteurs de champ. D'un point de vue technologique, la grande valeur de PMA permet d'obtenir des parois de domaine étroites, ce qui fait de ces films de bons candidats pour la mémoire en piste à base de parois de domaine à haute densité [9]. En outre, l'interaction DMI, résultant de l'interaction entre spins voisins via un atome de matériau lourd donne lieu à des structures de spin non colinéaires. Cette iDMI est un phénomène émergent récent qui affecte les propriétés magnétiques statiques et dynamiques des systèmes FM/HM à base de films ultramincés. Cette interaction apparaît en l'absence de symétrie d'inversion spatiale et en présence d'une forte interaction spin-orbite. Elle modifie les propriétés statiques et dynamiques des parois de domaine, provoque la non réciprocity de la propagation des ondes de spin ainsi que l'apparition des structures chirales de spin telles que les skyrmions magnétiques.

## Travail proposé

Compte tenu de l'impact technologique de ces trois paramètres sur les dispositifs spintroniques, l'objectif de ce travail de thèse concerne l'étude de l'amortissement induit par le pompage de spin, l'anisotropie magnétique perpendiculaire et l'interaction iDMI dans les systèmes à base de FE/FM/HM. L'idée est de contrôler leurs intensités via un champ électrique par la variation des épaisseurs de des matériaux FM, FE et HM ainsi que par traitement thermique (recuit ou température de mesures). À cette fin, des techniques de résonance ferromagnétique (FMR), de diffusion Brillouin de la lumière (BLS) couplées au magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) ont

été utilisées. Fondamentalement, l'anisotropie magnétique d'interface et l'iDMI dans les systèmes FM/HM proviennent toutes les deux de la brisure de symétrie d'inversion et de couplage spin-orbite d'interface. Cependant, peu d'études ont examiné leur dépendance relative vis-à-vis de la température dans les hétérostructures en couches minces et par conséquent leur corrélation ce qui pourrait fournir des informations capitales sur leurs origines communes.

## Méthodologie/organisation et échéancier

L'objectif de ce projet de thèse est le contrôle électrique de la PMA et la DMI dans les systèmes à base de HM/FM/Oxyde déposés sur substrat piézoélectriques (PE) ou sur Si recouvert avec une couche FE via la température ou/et les contraintes induites électriquement dans le matériau FE ou dans le PE. La DMI sera mesurée par la technique la plus directe, la diffusion Brillouin de la lumière (BLS) disponible au LSPM. Ce projet sera aussi étendu aux études de l'amortissement magnétique. Pour ce dernier et pour la PMA, la résonance ferromagnétique du LSPM sera utilisée. Les caractérisations structurales, d'interface et magnétiques statiques et la croissance des couches minces se feront par nos collaborateurs au **C2N et à Cluj-Napoca en Roumanie** en utilisant la réflectivité des rayons x, la microscopie électronique à transmission et la magnétométrie à échantillon vibrant. Le projet est organisé en plusieurs étapes : outre la gestion et la prise de contact du doctorant avec les différents collaborateurs, nous allons d'abord identifier, déposer, caractériser la DMI, la PMA et leur relation avec la qualité des interfaces et enfin valider les meilleurs matériaux, puis mesurer et optimiser le contrôle électrique et par température de la DMI et la PMA en guise de la stabilité des skyrmions. Ces différentes étapes sont détaillées ci-dessous :

- Prise de contact entre les membres des équipes : Cette étape consiste à discuter les ressources disponibles dans chaque laboratoire et assurer leur utilisation optimale pour atteindre les objectifs.
- Discussion et choix des systèmes d'intérêt: plusieurs systèmes tels que Pt/Co/Oxyde, Pt/CoFeB/Oxyde, Ir/CoFeB/Oxyde et W/CoFeB/Oxyde déposés sur des substrats de PMN-PT ou des couches minces de PZT seront discutés lors des 4 premiers mois du projet. Deux orientations cristallographiques de PMN-PT, en l'occurrence PMN-PT(011) et PMN-PT(100) seront considérées. En effet, la réponse à la déformation de PMN-PT dépend de son orientation : PMN-PT(001) présente une déformation biaxiale isotrope tandis que PMN-PT(011) génère une forte déformation piézoélectrique anisotrope dans le plan lorsqu'un champ électrique est appliqué le long de la direction perpendiculaire au plan des films. Cette différence dans les caractéristiques de déformation conduit à une modulation distincte des propriétés magnétiques induites par la déformation. Il convient de mentionner que PMN-PT(011) et qu'après la suppression du champ électrique, l'échantillon reste dans l'état polarisé (déformation non volatile). Ceci permettra la caractérisation de DMI, PMA et amortissement *ex situ*, en combinant la BLS et la FMR pour l'état de déformation non volatile après la suppression de la tension électrique. Un intérêt particulier sera accordé à deux types d'oxydes : MgO (déjà utilisé dans les jonctions magnétiques tunnel) et HfO<sub>2</sub> (très prometteur pour les applications magnéto-ioniques).
- Déposer, caractériser, mesurer et comprendre les contributions des DMI dans divers systèmes ainsi que la corrélation entre DMI, PMA, qualité d'interface et l'évolution des domaines ferroélectriques. La première sera dédiée au développement de l'intégration de films minces FM sur

des films minces FE. L'expertise de l'équipe OXIDE du C2N pour l'élaboration et la caractérisation structurale et fonctionnelle de films minces par ablation laser pulsée (PLD), sur substrat perovskite ou silicium sera exploitée pour faire croître des films de Haute qualité à fort coefficient piézoélectrique. Par la suite, le savoir-faire établi du collaborateur Roumain pour le dépôt de films minces à aimantation perpendiculaire sera mis en œuvre pour intégrer des films minces à fort DMI sur les couches minces piézoélectrique. L'intégration sur Silicium ouvre à l'intégration sur une électronique Silicium mais aussi la maximisation de la contrainte en réduisant l'emprise mécanique du substrat. L'utilisation d'un substrat piézoélectrique type PMN-PT dans l'éventualité où l'intégration sous forme de films mince échouerait. Afin d'étudier la DMI et la PMA d'interface dans les tricouches citées ci-dessus, nous étudierons l'effet l'épaisseur de la couche FM en considérant des couches ultraminces. Ceci pourraient améliorer le transfert de la déformation du piézoélectrique et entraîne une modulation de des propriétés magnétiques d'interface induite par la déformation piézoélectrique plus importante dans ces hétérostructures multiferroïques que dans les hétérostructures multiferroïques traditionnelles avec un matériau FM d'épaisseur plus grande. L'effet du recuit sera aussi considéré lors de cette étape. Ces études aideront à développer une compréhension plus profonde de la DMI, ce qui permettra d'adapter cette propriété d'interface pour optimiser davantage le contrôle des skyrmions. Tout le long de cette étape qui durera pendant toute la durée de projet, un échange régulier sera organisé afin que nous puissions améliorer le choix des systèmes et des phénomènes étudiés.

- Mesures de DMI et PMA en fonction de la température. Cette étude sera exclusive par BLS. Pour cela, le doctorant commencera par l'intégration du système de chauffage (déjà conçu et réalisé) dans le banc de mesure BLS. Les mesures seront faites en variant la température de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ .
- Optimiser la variation de la DMI et de la PMA pour stabilisation de skyrmions. Dans chaque série d'échantillons, nous sélectionnerons des échantillons pour effectuer des observations de skyrmions. L'imagerie magnétique sera réalisée au LSPM à l'aide de microscopes magnéto-optiques pour les skyrmions à l'échelle du micron et à l'aide de microscopes à force magnétique pour les skyrmions plus petits. Cette étape sera menée principalement lors la fin de la deuxième année du projet.

## Profil du candidat

De bonnes connaissances dans le domaine de la physique de la matière condensée et en micro-ondes sont requises. La personne recrutée doit être avoir un goût prononcé pour les mesures expérimentales. Les concepts de base de la nanofabrication (nanostructuration) et du travail en salle blanche sont un plus.

## Références

- [1] M. Fiebig, J. Phys. D: Appl. Phys. 38, R123 (2005).
- [2] C. A. F. Vaz, J. Hoffman, C. H. Ahn, R. Ramesh, Adv. Mater. 22, 2900 (2010).
- [3] S. Fusil, V. Garcia, A. Barthélémy, M. Bibes, Annu. Rev. Mater. Res., 44, 91 (2014).
- [4] A. T. Chen and Y. G. Zhao, APL MATERIALS 4, 032303 (2016).
- [5] A. Molinari, H. Hahn and R. Kruk, Adv. Mater. 31, 1806662 (2019).

- [6] A. Capua, S-h. Yang, T. Phung and S. S. P. Parkin, Phys. Rev. B 92, 224402 (2015).
- [7] S. Lepadatu, Scientific Reports 9, 9592 (2019).
- [8] V.V. Kruglyak, S. O. Demokritov and D. Grundler, J Phys. D: Appl. Phys. 43, 264001. (2010).
- [9] S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas, Science 320, 190 (2008).